

РЕФЕРАТ

Магістерську дисертацію виконано на 92 сторінках, що містить 4 розділи, 27 ілюстрацій, 22 таблиці та 32 джерел в переліку посилань.

Об'єктом дослідження в роботі є ефект Фарадея в умовах неоднорідних фізичних полів.

Метою дослідження є дослідження особливостей ефекту Фарадея в умовах дії неоднорідних фізичних полів, та оцінка можливості його застосування для дослідження матеріалів методом модуляційної поляриметрії.

В першому розділі класифікується, та дається описання основним поляризаційним ефектам. Також дається вичерпне описання ефекту Фарадея та обґрунтовується перспективність його дослідження з точки зору дослідження матеріалів на основі останніх наукових публікацій.

В другому розділі описується основний елемент модуляційної поляриметрії – фотопружний модулятор поляризації. Дається опис фізичних процесів його функціонування, а також приводяться математичне обґрунтування того, що за його допомогою можна здійснити повний Стокс-поляриметричний аналіз, тобто визначити всі компоненти вектора Стокса.

В третьому розділі викладена методика вимірювань, приводиться схема вимірювальної установки з детальним поясненням призначення кожної з її складових. Приведені результати дослідження для основного дослідного зразка в даній роботі – кремнію, а також для двох додаткових матеріалів: алюмосилікатної склокераміки та неодимового скла. Також в даному розділі проводиться аналіз отриманих результатів, оцінка достовірності отриманих даних, їх точність та можливість подальшого використання в контексті модуляційної поляриметрії для дослідження матеріалів.

В четвертому розділі подається розроблення стартап проекту.

ABSTRACT

The work presented on 92 pages contains 4 sections, 27 illustrations, 22 tables and 32 sources in the list of references.

Faraday effect features under conditions of inhomogeneity potential in silicon was the object of the study.

The purpose of this work is to investigate the features of Faraday effect under conditions of inhomogeneity potential, and to evaluate the possibility of its application for the study of materials by the method of modulation polarimetry.

The first chapter provides an overview of the literature, which examines main polarization effects. Also, a comprehensive description of Faraday effect is given and the prospects of its research from the point of view of research of materials based on the latest scientific publications are substantiated.

The second section describes the main element of modulation polarimetry - the photovoltaic modulator of polarization. A description is given of the physical processes of its functioning, as well as the mathematical justification for using it to complete the Stokes-polarimetric analysis, that is, to determine all components of the Stokes vector.

The third section describes the measurement methodology, gives a diagram of the measuring unit with a detailed explanation of the purpose of each of its components. The results of the research for the main experimental sample in this work - silicon, as well as for two additional materials: aluminium silicate glass ceramic and neodymium glass are given. Also, in this section, the analysis of the obtained results, the assessment of the reliability of the data obtained, their accuracy and the possibility of further use in the context of modulation polarimetry for the study of materials is carried out.

In the fourth chapter the development of a startup project was presented.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1	12
ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.	12
ОПТИЧНІ ПОЛЯРИЗАЦІЙНІ ЕФЕКТИ ТА ЕФЕКТ ФАРАДЕЯ	12
1.1 Класифікація оптичних поляризаційних ефектів, що виникають при розповсюдженні електромагнітного випромінювання в анізотропному кристалі. Визначення та терміни.....	12
1.2 Ефект Фарадея.....	15
1.2.1 Загальні відомості	16
1.2.2 Історія відкриття	17
1.2.3 Фізичне пояснення ефекту Фарадея	18
1.2.4 Математичне формулювання.....	20
1.2.5 Електромагнітні основи ефекту Фарадея	21
1.2.5 Ефект Зеемана	23
1.2.6 Застосування ефекту Фарадея для вимірювання параметрів матеріалів.....	25
Висновки до розділу	28
РОЗДІЛ 2	30
МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА ЇЇ ОСОБЛИВОСТІ	30
2.1 Конструкція фотопружного модулятора поляризації	30
2.2 Фізичний принцип функціонування модулятора поляризації на основі фотопружного ефекту.....	32
2.3 Використання фотопружного модулятора для повного поляризаційного аналізу довільно поляризованої хвилі	38

Висновки до розділу	47
РОЗДІЛ 3	48
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТУ ФАРАДЕЯ В УМОВАХ НЕОДНОРІДНОГО ПОТЕНЦІАЛУ В ТВЕРДОМУ ТІЛІ	48
3.1 Дослідна установка.....	48
3.2 Дослідні зразки.....	55
3.2.1 Кремній	56
3.2.1 Алюмосилікатна склокераміка	57
3.2.3 Неодимове скло	58
3.3 Методика проведення експерименту та результати.....	61
3.3.1 Алюмосилікатна склокераміка та неодимове скло	61
3.3.2 Кремній	64
Висновки до розділу	70
РОЗДІЛ 4	71
РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ [32].....	71
4.1 Опис ідеї проекту.....	71
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту	73
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	74
4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту	81
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	84
Висновки по розділу	87
ВИСНОВКИ.....	88
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	90

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

Скорочення	Розшифрування
МП	модуляційна поляриметрія
ФМП	фотопружний модулятор поляризації
ПЦП	правоциркулярна поляризація
ЛЦП	лівоциркулярна поляризація
МО	магнітооптичні
КТ	квантова точка
N	комплексний показник заломлення
n	показник заломлення
k	показник поглинання
Δn	різниця показників заломлення
Δk	різниця показників поглинання
$\Delta n_{\text{л}}$	різниця показників заломлення для лінійно поляризованих хвиль
$\Delta n_{\text{ц}}$	різниця показників заломлення для циркулярно поляризованих хвиль
B	магнітна індукція
H	напруженість магнітного поля
C_v	константа Верде
d	товщина зразка
θ	кут повороту площини поляризації
ω	кутова частота
c	швидкість світла

λ	довжина хвилі
ε	діелектрична проникність
N	концентрація носіїв
m^*	ефективна маса електрона
δ	зсув фаз
L	розмір пластинки в напрямку поширення світла
C	константа фотопружності
σ	механічна напруга
λ_p	довжина акустичної хвилі в плавленому кварці
σ_0	початковий зсув довільної точки по координаті x
S	вектор Стокса
I, Q, U, V	компоненти вектора Стокса
M	матриця Мюллера

ВСТУП

Експериментальні дослідження оптичних властивостей матеріалів в останні два десятиліття дозволили отримати обширні відомості про їх фізичні властивості. Серед цих властивостей параметри та структура енергетичних зон є основоположними, що визначають практичне застосування того чи іншого матеріалу. Поряд з оптичними методами дослідження успішно розвивались і магнітооптичні: циклотронний резонанс, магнітопоглинання, магнітоплазмове відбиття, ефекти Фарадея і Фогта та ін. Серед магнітооптичних методів дослідження напівпровідників найбільше поширення отримав ефект Фарадея, що є одним з методів який дозволяє найбільш повно визначити параметри зонної структури: величини ефективної маси і g – фактор для електронів і дірок, а також знаки g – фактора. Ефект полягає в тому, що при розповсюдженні лінійно поляризованого світла через речовину, яка знаходиться в магнітному полі, паралельному напрямку розповсюдження світла, площина поляризації змінює своє азимутальне положення, так звана циркулярна фазова анізотропія.

Незважаючи на давню історію ефекту і наявність численних методів його вимірювання перед дослідниками весь час стояла проблема підвищення точності та чутливості засобів вимірювання ефекту Фарадея, адже від цього залежить можливість виявити його нові особливості в матеріалах. Однак, при підвищенні чутливості виникає проблема похибки в результаті впливу на вимірювання інших поляризаційних ефектів. Для ефекту Фарадея це насамперед лінійне двопроменезаломлення, що призводить до перетворення лінійно поляризованого світла при розповсюдженні через речовину з анізотропією діелектричних властивостей в еліптично поляризоване. Причина такого перетворення може бути різноманітною: одновісна деформація в наслідок неоднорідності структури речовини або нерівномірного розподілу домішок та дефектів, нерівномірний нагрів, тощо. В будь якому випадку частина світла, що стала циркулярно поляризованою

може вносити похибку у вимірювання ефекту Фарадея. Отже, метою роботи є дослідження взаємного впливу ефектів циркулярної та лінійної фазової анізотропії та пошук чутливої методики, яка спроможна розділити ці два явища.

Обом вимогам відповідає метод модуляційної поляриметрії, коли на зразок, що досліджується, спрямовується лінійно поляризоване світло, а модулятор поляризації з лінійним поляризатором розташовуються за зразком та виконують роль динамічного аналізатора. По-перше, такий метод є досить інформативним як з точки зору виявної здатності, так і чутливості до впливу різноманітних зовнішніх та внутрішніх чинників, що викликають анізотропію властивостей досліджуваного об'єкту. По-друге, обчислення з використанням матричної оптики показало спроможність методу до повного Стокса поляриметричного аналізу, оскільки інтенсивність світла падаючого на фотодетектор має декілька перемінних складових [1].

В даній роботі проводилися дослідження взаємовпливу лінійної та циркулярної фазової анізотропії на декількох зразках, а саме: кремнію, алюмосилікатної склокераміки та неодимового скла. Циркулярна фазова анізотропія викликала за рахунок ефекту Фарадея, а лінійна фазова – за рахунок зовнішнього стискаючого зусилля (склокераміка та скло), або нерівномірного розподілу домішок (кремній).

РОЗДІЛ 1

ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.

ОПТИЧНІ ПОЛЯРИЗАЦІЙНІ ЕФЕКТИ ТА ЕФЕКТ ФАРАДЕЯ

1.1 Класифікація оптичних поляризаційних ефектів, що виникають при розповсюдженні електромагнітного випромінювання в анізотропному кристалі. Визначення та терміни

Як відомо, характер взаємодії випромінювання з речовиною повністю описується за допомогою комплексного показника заломлення [2, 3]:

$$N = n - ik \quad (1.1)$$

n - показник заломлення;

k - показник поглинання.

Як видно з формули (1.1) комплексний показник заломлення включає два доданки, які і визначають два різних ефекти. Ефект подвійного променезаломлення пов'язаний з анізотропією показника заломлення Δn і може спостерігатися як в діапазоні прозорості зразка, коли поглинання відсутня, так і напівпрозорості. Ефект дихроїзму пов'язаний в свою чергу з анізотропією показника поглинання Δk і, отже, спостерігається тільки в діапазоні напівпрозорості. Загальноприйняті визначення подвійного променезаломлення і дихроїзму можна знайти в багатьох підручниках [4-7]. Тому, не вдаючись у подробиці визначень, розглянемо тільки зміну стану поляризації випромінювання, що пройшло крізь анізотропну речовину. При цьому слід мати на увазі, що під станом поляризації розуміється сукупність параметрів, що характеризують в загальному випадку еліптичну

поляризацію. А так як будь-яку еліптично поляризовану хвилю можна розкласти на дві компоненти, одна з яких циркулярно, а друга лінійно поляризована, то і обидва ефекти - подвійного променезаломлення і дихроїзму - поділяються на два - лінійний і циркулярний (рис. 1.1). Причому при нормальному падінні світла лінійні поляризаційні ефекти спостерігаються тільки в тому випадку, якщо світло поширюється не вздовж оптичної осі анізотропного кристала [8].

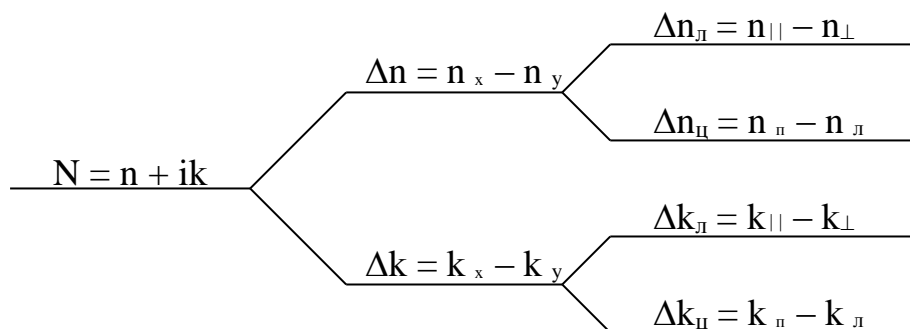


Рисунок 1.1 - Класифікація оптично-поляризаційних ефектів

Почнемо розгляд з лінійного двопронезаломлення. Уявімо, що на анізотропний зразок падає лінійно поляризоване світло, причому кут між площиною поляризації та оптичною віссю зразка складає 45° . Тоді таку електромагнітну хвилю можна розкласти на дві ортогональні лінійно поляризовані, причому площини поляризації цих хвиль будуть паралельні і перпендикулярні до оптичної вісі зразка. У анізотропному зразку показники заломлення для цих лінійних поляризацій різні $\Delta n_{\text{л}} = n_{||} - n_{\perp}$, тому, внаслідок співвідношення $v=c/n$, швидкість поширення цих хвиль стає різною. З цієї причини на довжині оптичного ходу відбувається набіг різниці фаз між хвилями з ортогональними лінійними поляризаціями. За рахунок цього з'являється циркулярна компонента, і світло, що вийшло зі зразка в загальному випадку стає еліптично поляризованим без зміни інтенсивності.

Під циркулярним двопронезаломленням розуміють зміну стану поляризації за рахунок зсуву фаз між двома ортогональними циркулярними поляризаціями. Будь-яку лінійно поляризовану хвилю можна розкласти на дві ортогонально циркулярно поляризовані. Якщо показники заломлення для цих поляризацій різні $\Delta n_{\text{ц}} = n_{\text{п}} - n_{\text{л}}$, тоді між ними виникає зсув фаз і їх складання на виході дасть лінійно поляризовану хвилю, інтенсивність якої залишиться незмінною, а площина поляризації буде повернута на певний кут відносно площини поляризації падаючої хвилі.

Ефект дихроїзму визначається різницею показників поглинання Δk для двох ортогональних поляризацій. В спектральному діапазоні, де спостерігається дихроїзм, природно проявляється і ефект двопронезаломлення, тобто стан поляризації світла, що проходить змінюється відповідним чином. Але при дослідженні дихроїзму (лінійного або циркулярного) зразок опромінюють двома ортогональними, поляризованими відповідним чином, хвилями поперемінно і реєструють різницю інтенсивності цих хвиль після проходження зразка. При цьому різниця швидкості поширення випромінювання в речовині і обумовлена цим фаза хвилі на виході не є об'єктом експерименту. Все ж розглянемо, як у випадку ефекту дихроїзму зміниться поляризація світла що пройшло анізотропний зразок, при цьому будемо вважати, що ефект двопронезаломлення відсутній $\Delta n = 0$.

Для розгляду лінійного дихроїзму скористаємося тими ж уявленнями, що і для лінійного двопронезаломлення. Лінійно поляризоване світло, площина поляризації якого становить 45° з оптичною віссю зразка, розкладаємо на дві ортогональні лінійно поляризовані хвилі. За рахунок анізотропії показника поглинання $\Delta k_{\text{л}} = k_{||} - k_{\perp}$ одна з них більше поглинається. Тоді при складанні цих хвиль на виході вийде лінійно поляризована хвиля, площину поляризації якої буде повернуто на певний кут щодо азимута поляризації падаючої хвилі. На відміну від результату,

отриманого для циркулярного подвійного променезаломлення, в даному випадку зміниться не тільки орієнтація електричного вектора хвилі, а й зменшиться її інтенсивність.

У разі циркулярного дихроїзму, коли по-різному поглинаються дві ортогональні циркулярні поляризації $\Delta k_{\text{ц}} = k_{\text{п}} - k_{\text{л}}$, з подібних міркувань не важко зробити висновок, що в результаті їх складання на виході вийде еліптично поляризована хвиля з меншою інтенсивністю.

Таким чином, в анізотропному кристалі можуть проявлятися чотири оптичних поляризаційних ефекти. Причому два з них, а саме лінійне подвійне променезаломлення і циркулярний дихроїзм призводять до перетворення кута еліптичності, тоді як циркулярне подвійне променезаломлення і лінійний дихроїзм до зміни кута орієнтації еліпса, який виходить як проекція на площину кінця вектора електричного поля поляризованої хвилі при її поширенні уздовж нормалі до поверхні. У першому випадку перетворення параметрів поляризації відбувається, або за рахунок фазового зсуву між ортогональними лінійними компонентами електричного поля хвилі, або за рахунок різного поглинання ортогональних циркулярних компонент. У другому - за рахунок зміни відносного фазового зсуву між ортогональними циркулярними компонентами, на які розкладається лінійно поляризована хвиля, або за рахунок різного поглинання ортогональних лінійних компонент. При цьому ефекти дихроїзму зменшують інтенсивність випромінювання, тому іноді говорять, що у речовині, в якій спостерігається дихроїзм, має місце циркулярна або лінійна амплітудна анізотропія [9]. А те, що подвійне променезаломлення не впливає на інтенсивність світлової хвилі, в даному випадку говорять про наявність в речовині кругової або лінійної фазової анізотропії.

1.2 Ефект Фарадея

Оскільки головним об'єктом дослідження дисертації є поведінка ефекту Фарадея при різних зовнішніх впливах на досліджувані зразки, слід більш детально його розглянути. А саме, історію його відкриття, математичні та фізичні моделі, що описують його, та, найголовніше, огляд його застосування для вимірювання параметрів матеріалів.

1.2.1 Загальні відомості

У фізиці ефект Фарадея або обертання Фарадея є магнітооптичним явищем, тобто взаємодією між світлом і магнітним полем в середовищі. Ефект Фарадея викликає обертання площини поляризації, яке лінійно пропорційне компоненті магнітного поля в напрямку розповсюдження (рис. 1.2). Формально це особливий випадок гіроелектромагнетизму, отриманий, коли тензор діелектричної проникності є діагональним.

Ефект Фарадея, відкритий Майклом Фарадеєм в 1845 році, був першим експериментальним доказом того, що світло та електромагнетизм пов'язані між собою. Теоретичні основи електромагнітного випромінювання (що включає видиме світло) були завершені Джеймсом Клерком Максвелом у 1860-х і 1870-х роках. Цей ефект виникає в більшості оптично прозорих діелектричних матеріалів (включаючи рідини) під впливом магнітних полів.

Ефект Фарадея зумовлений ліво- і правоциркулярно поляризованими хвилями, що поширюються з дещо різною швидкістю, властивість, відома як циркулярне двоприменезаломлення. Оскільки лінійна поляризація може бути розкладена на суперпозицію двох рівноамплітудних циркулярно поляризованих компонент протилежного напрямку і різної фази, ефект відносного фазового зсуву, викликаний ефектом Фарадея, полягає у повороті орієнтації лінійної поляризації хвилі.

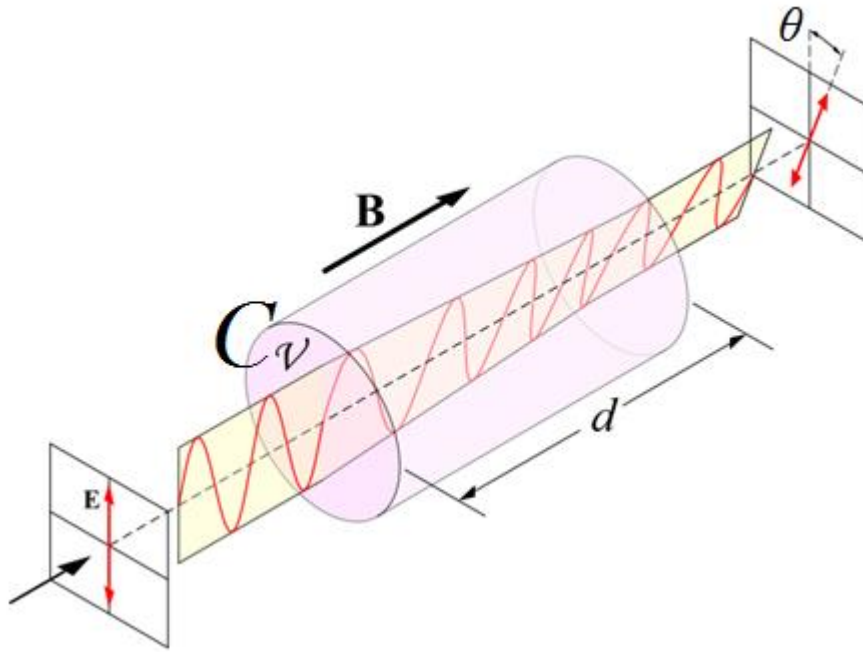


Рисунок 1.2 - Обертання площини поляризації за рахунок ефекту
Фарадея

θ - кут повороту площини поляризації;

C_v - константа Верде;

d - товщина зразка;

B - магнітна індукція.

1.2.2 Історія відкриття

До 1845 р. завдяки роботам Френеля, Малюса та інших було відомо, що різні матеріали здатні змінювати напрям поляризації світла при певному орієнтуванні, це перетворило використання поляризованого світла в потужний інструмент для дослідження властивостей прозорих матеріалів. Фарадей вважав, що світло - це електромагнітне явище, і на нього повинні впливати електромагнітні сили. Він приклав значні зусилля, щоб знайти докази електричних сил, що впливають на поляризацію світла через те, що тепер називають електрооптичними ефектами. Проте його експериментальні

методи були недостатньо чутливими, і ефект був виміряний лише тридцятьма роками пізніше Джоном Кером [10].

Тоді Фарадей намагався дослідити вплив магнітних сил на світло, що проходить через різні речовини. Після кількох невдалих випробувань він випробував шматочок "важкого" скла, що містить сліди свинцю, який він зробив під час своєї попередньої роботи з виробництва скла. Фарадей зазначив, що коли промінь поляризованого світла проходить крізь скло у напрямку прикладеного магнітного поля, поляризація світла повертається на кут, пропорційний силі цього магнітного поля. Пізніше він зміг відтворити ефект у кількох інших твердих тілах, рідинах та газах шляхом використання більш сильних електромагнітів [11].

1.2.3 Фізичне пояснення ефекту Фарадея

Лінійно поляризоване світло, яке, як видно, обертається в ефекті Фарадея, можна розглядати як таке, що складається з суперпозиції право- та лівоциркулярно поляризованого випромінювання (рис. 1.3) (цей принцип суперпозиції є фундаментальним у багатьох галузях фізики).

Ми можемо розглянути вплив кожної компоненти (ліво- та правоциркулярної поляризації) окремо, і подивитися, який вплив це має на кінцевий результат.

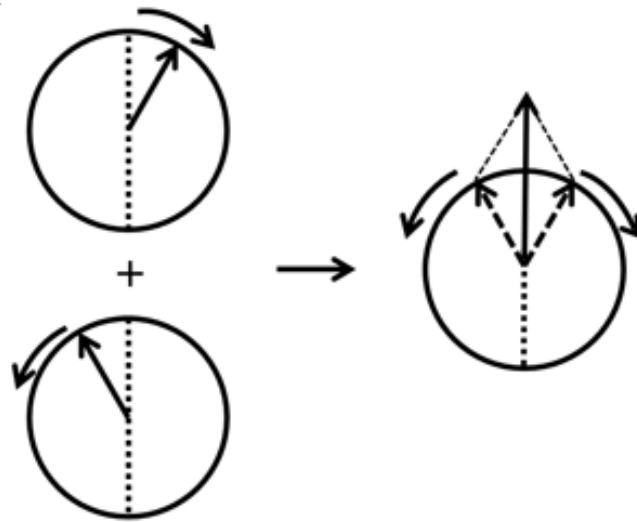


Рисунок 1.3 - Суперпозиція ліво- та правоциркулярної поляризації світла, що призводить до лінійного поляризованого світла

У циркулярно поляризованому світлі напрямок електричного поля обертається на частоті світла, або за годинниковою стрілкою, або проти годинникової стрілки. В матеріалі це електричне поле впливає на заряджені частинки, що містяться в цьому матеріалі, особливо сильно це поле впливає на електрони через їх малу масу. Таким чином, рух частинок буде циркулярним, а циркулярні рухомі заряди утворюють власне магнітне поле на додаток до зовнішнього магнітного поля. Таким чином, буде дві різні випадки: створюване поле буде співпадати з зовнішнім полем для однієї кругової поляризації, та в протилежному напрямку для ортогональної поляризації - таким чином, магнітне поле збільшується в одному напрямку і зменшується в протилежному напрямку. Це змінює динаміку взаємодії для кожної хвилі, і одна з хвиль буде сповільнюватися більше, ніж інша, що спричинить різницю в фазі між лівою та правою циркулярною поляризацією. Коли після цього фазового зсуву дві хвилі знову додаються, результатом є лінійно поляризована хвиля, але з обертанням площини поляризації.

Напрямок обертання поляризації залежить від властивостей матеріалу, через який проходить світло. Повне розглядання повинно було б враховувати

вплив зовнішніх та випромінюваних полів на хвильову функцію електронів, а потім обчислити вплив цієї зміни на показник заломлення матеріалу для кожної поляризації, щоб з'ясувати, право- чи лівоциркулярна поляризація більше сповільнюється.

1.2.4 Математичне формулювання

Взаємозв'язок між кутом повороту поляризації та магнітним полем у прозорому матеріалі є:

$$\theta = \frac{1}{2} \frac{\omega}{c} (n_n - n_l) d = \frac{\pi}{\lambda_0} (n_n - n_l) d \quad (1.2)$$

θ – кут повороту (в радіанах)

ω – кутова частота;

c – швидкість світла;

d – товщина зразка;

λ – довжина хвилі;

$(n_n - n_l) = \Delta n$ - різниця показників заломлення для право- та лівополяризованого світла.

Формулу (1.2) можна переписати в наступному виді:

$$\theta = C_v B d \quad (1.3)$$

B - індукція магнітного поля (в Теслах);

C_v – константа Верде.

Константа Верде - це емпірична константа пропорційності (в одиницях рад/(Т·м)) змінюється залежно від довжини хвилі та температури [12], і є різною для різних матеріалів.

Додатна константа Верде відповідає L-обертанню (проти годинникової стрілки), коли напрям розповсюдження паралельний магнітному полю та R-обертанню (за годинниковою стрілкою), коли напрямок розповсюдження є антипаралельним. Таким чином, якщо промінь світла проходить через матеріал і відбивається назад через нього, обертання подвоюється.

1.2.5 Електромагнітні основи ефекту Фарадея

Магнітооптичні (МО) ефекти найкраще описуються з точки зору тензора діелектричної проникності ϵ середовища, в якому відбувається взаємодія між світлом і прикладеного магнітного поля (або внутрішньої намагніченості середовища).

$$\epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon_{XX} & \epsilon_{XY} & \epsilon_{XZ} \\ \epsilon_{YX} & \epsilon_{YY} & \epsilon_{YZ} \\ \epsilon_{ZX} & \epsilon_{ZY} & \epsilon_{ZZ} \end{pmatrix}$$

У ізотропному матеріалі (наприклад, звичайному склі) три діагональні елементи ϵ ідентичні, а в присутності магнітного поля вздовж осі Z присутній ненормальний недіагональний елемент ϵ' , який з'єднує x- і y-компоненти оптичного E-поля, тобто

$$\epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon & \epsilon' & 0 \\ -\epsilon' & \epsilon & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon \end{pmatrix}$$

Загалом, ϵ і ϵ' залежать від довжини хвилі, але в вузькому діапазоні довжин хвиль їх можна розглядати як константи. У прозорому матеріалі, де немає оптичного поглинання, ϵ є реальним, а ϵ' - уявним. Однак у самому загальному випадку у МО поглинаючому матеріалі як ϵ , так і ϵ' можуть бути комплексними числами. Для діа- та парамагнітних середовищ ϵ' пропорційний прикладеному магнітному полі \mathbf{H} , тоді як для ферро- та ферромагнітних матеріалів спін-орбітальна взаємодія є домінуючим джерелом МО взаємодії, що робить ϵ' пропорційним намагніченості \mathbf{M} середовища. Так як $\mathbf{B} = \mathbf{H} + 4\pi\mathbf{M}$ (в системі Сі), то \mathbf{B} -поле всередині середовища може бути позначено як джерело МО ефектів.

Коли поляризована хвиля поширюється в середовищі вздовж напрямку магнітного поля \mathbf{B} , матеріал взаємодіє з право- та лівоциркулярно поляризованою компонентою з різними показниками заломлення,

$$n_{\perp, \parallel} = (\epsilon \pm i \epsilon')^{1/2}.$$

Наприклад, для плавленого кварцевого скла на довжині хвилі $\lambda = 550$ нм,

$\epsilon = 2,25$ і $\epsilon' = 10^{-7}$ на кЕ (кіло Ерстед) прикладеного поля (обидва n_{\perp} та n_{\parallel} в даному випадку є реальними, а тому не відбувається поглинання). Для лінійно поляризованого світла, що проходить через матеріал товщиною d під впливом \mathbf{B} -поля, фази циркулярно поляризованих компонент зміщуються одна відносно іншої.

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} (n_{\parallel} - n_{\perp})d \quad (1.4)$$

Зміна відносної фази між компонентами ПЦП і ЛЦП еквівалентна обертанню площини поляризації на кут Фарадея $\theta = 1/2\Delta\varphi$ (що приводить нас до вже відомої формули (1.2.)).

У наведеному вище прикладі $\theta \sim 0,22^\circ$ при $\lambda = 550$ нм для зразка завтовшки 1 см, що розміщений у магнітному полі 1 кЕ. Значення $0,22^\circ/\text{см}/\text{кЕ}$ є константою Верде для плавленого кварцу на заданій довжині хвилі.

Деякі магнітні матеріали (наприклад, магнітні гранати) є досить прозорими, щоб передавати значну частку світла, створюючи тим самим значне обертання Фарадея. Ці матеріали можна намагнічувати в заданому напрямку і підтримувати їх намагніченість при знятті зовнішнього поля. Тому ефект Фарадея в цих матеріалах можна спостерігати за відсутності зовнішнього магнітного поля. Наприклад, при $\lambda = 550$ нм типовий кристал bismuth-substituted rare-earth iron garnet може мати $\epsilon \approx 5,5 + 0,025i$ та $\epsilon' \approx 0,002-0,01i$. Таким чином, комплексні показники заломлення для ПЦП та ЛЦП світла є такими $(n + ik)^{\text{П}} \approx 2.347 + 0.006i$ та $(n + ik)^{\text{Л}} \approx 2.343 + 0.005i$, що дає кут повороту Фарадея $\theta \approx 1.3^\circ$ для зразка мікронної товщини цього кристалу. Коефіцієнт поглинання матеріалу α дорівнює $4\pi k d / \lambda$, де k - уявна частина комплексного показника заломлення. Отже, для вищезазначеного гранату, $\alpha \approx 0,12$ на мікрон, що еквівалентно втраті світла на 1дБ на кожні 2 мкм товщини кристала. Іншими словами, цей гранат забезпечує $2,6^\circ$ повороту поляризації на дБ втрати. Ці кристали можна вирощувати в діапазоні товщини від частки від мікрона до приблизно 100 мкм. Товсті кристали корисні на довших довжинах хвиль, де втрати невеликі, але обертання Фарадея зазвичай зменшується з збільшенням довжини хвилі [11].

1.2.5 Ефект Зеемана

Пояснення ефекту Фарадея, що було дано вище є досить наочним, проте не пояснює причину його виникнення. В роботах [13] та [14] йдеться про тісний зв'язок між ефектом Фарадея та ефектом Зеемана. Тому для більш глибокого розуміння фізики процесу, треба розглянути цей ефект.

В 1896 р. Зеєман (1865-1943) виявив, що спектральні лінії певним чином розщеплюються, якщо джерело світла поміщається в магнітне поле. У дослідженні Зеєманна досліджувалася дуже вузька зелено-блакитна лінія кадмія і застосовувалися магнітні поля 10 000-15 000 Гс.

В книзі [15] подається таке пояснення ефекту Зеємана. У перших дослідах Зеєман виявив, що при спостереженні поперек поля спектральна лінія розщеплюється на три лінійно поляризовані компоненти. Середня компонента незміщена, крайні зміщені в протилежні сторони на однакові відстані (в шкалі частот). Зсув пропорційний напруженості зовнішнього магнітного поля \mathbf{B} . У середній компоненті електричний вектор спрямований паралельно магнітному полю (такі компоненти називаються π -компонентами), в крайніх - перпендикулярно до нього (такі компоненти називаються σ -компонентами). Інтенсивність π -компоненти вдвічі, а кожної з σ -компонент в чотири рази менше інтенсивності вихідної лінії. При спостереженні вздовж магнітного поля виходить таке ж зміщення (при однаковій напруженості магнітного поля), що і в попередньому випадку, але незміщена компонента відсутня. Інтенсивність кожної компоненти вдвічі менше інтенсивності вихідної спектральної лінії.

Обидві компоненти поляризовані по колу в протилежних напрямках (їх прийнято називати також σ -компонентами). Якщо світло поширюється в напрямку магнітного поля, то σ -компонента з меншою частотою поляризована по правому, а з більшою - по лівому колу. При зміні напрямку магнітного поля на протилежне змінюється на протилежну і кругова поляризація обох компонент.

Електрон, що коливається випромінює електромагнітні хвилі. Випромінювання максимально в напрямку, перпендикулярному до прискорення електрона, а в напрямку прискорення відсутнє. Відповідно до класичної теорії, частота випромінюваного світла збігається з частотою коливання електрона. Але остання змінюється при включенні магнітного

поля. Тому повинна змінитися і частота випромінюваного світла. При спостереженні вздовж магнітного поля коливання в тому ж напрямку випромінювання не дає. Випромінювання створюється тільки круговим обертанням електрона. В результаті спостерігаються дві σ -компоненти з круговою поляризацією і частотами $\omega_0 + \Omega$ та $\omega_0 - \Omega$ (де Ω – ларморівська частота, що дорівнює $\Omega = \frac{e}{2mc} \mathbf{B}$). Якщо світло йде в напрямку вектора \mathbf{B} , то поляризація першої лінії буде лівою, а другої - правою. Саме відмінність у швидкостях між ПЦП та ЛЦП хвилями і призводить до ефекту Фарадея.

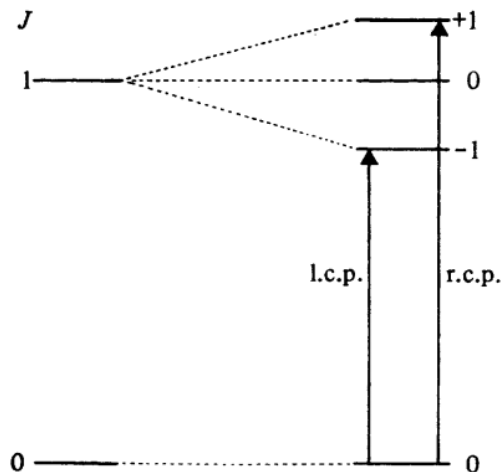


Рисунок 1.4 – Розщеплення зон, що спричинене впливом поздовжнього зовнішнього магнітного поля

1.2.6 Застосування ефекту Фарадея для вимірювання параметрів матеріалів

Не зважаючи на те, що на час написання цієї роботи ефект Фарадея відомий вже більш ніж 170 років, він не тільки не втратив своєї актуальності, але с кожним роком знаходить все більше і більше практичних застосувань.

В цьому розділі буде приведено досить широкий спектр застосувань ефекту Фарадея для дослідження параметрів матеріалів.

В роботі [16] пропонується метод, що дозволяє вимірювати ефективну масу електронів у GaAs (арсенід галію) за допомогою інфрачервоного ефекту Фарадея. Магнітно-оптичні методи займали провідну роль у вимірі ефективної маси електронів, проте широковідомі магнітно-оптичні методи, такі як циклотронний резонанс на інфрачервоних хвилях, осцилююче магніто-поглинання та інфрачервоний ефект Фарадея не застосовувалися на той час для дослідження арсеніду галію. Тому автори роботи запропонували використовувати ефект Фарадея на вільних носіях заряду, що визначає дисперсію, спричинену циклотронним резонансом, для визначення ефективної маси в матеріалі n-типу.

Масу можна визначити за наступною формулою:

$$m^* = \lambda \left(\frac{BNe^3}{8\pi^2 c^3 \varepsilon_0 n \theta} \right)^{1/2} \quad (1.5)$$

θ – кут повороту Фарадея;

λ – довжина хвилі;

N – концентрація носіїв;

n – показник заломлення;

B – індукція магнітного поля.

Проте метод мав певні недоліки, та з урахуванням недосконалості виміральної техніки на той час не знайшов подальшого застосування.

Незважаючи на це, ефект Фарадея знайшов багато інших застосувань.

На сьогоднішній день, одним з найбільш перспективним напрямком розвитку сучасної електроніки є спінтроніка [17]. Зважаючи на квантову природу ефекту Фарадея, він знайшов своє застосування і тут.

Так, в праці [18] ефект Фарадея застосовується для дослідження динаміки спінів молекулярних самозбірних колоїдних CdSe (селенід кадмію) квантових точок (КТ). Дослід проводиться наступним чином: досліджувані об'єкти (КТ) вбудовуються в діелектричні порожнини (рис. 1.5) в матеріалі. Визначається Q-фактор (добротність), що залежить від збільшення обертання Фарадея, це можна пояснити тим, що оптично збуджені спіни взаємодіють з багатьма фотонами, що розповсюджуються через порожнини. Таким чином використання такої методики дозволяє збільшити чутливість вимірів.

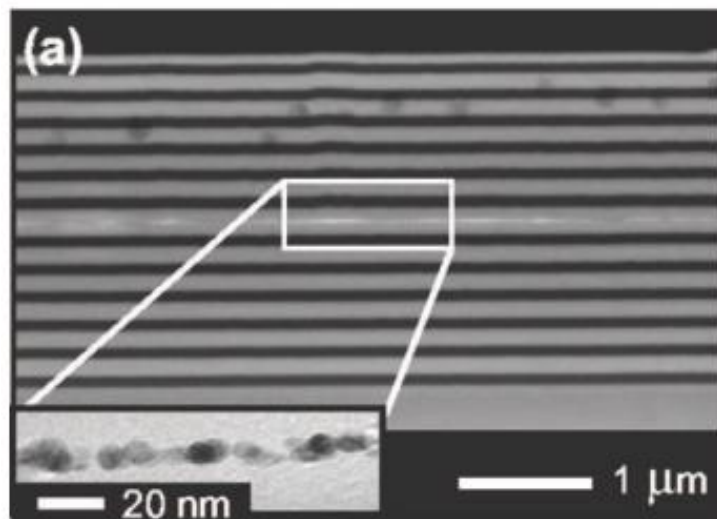


Рисунок 1.5 - Зображення діелектричних порожнин (переріз) та вбудованих КТ (збільшене зображення), зображення отримане за допомогою трансмісійного електронного мікроскопу

Також існує дуже перспективний метод дослідження одиничних спінів, що базується на ефекті Фарадея [19]. Це так званий pump-probe метод (метод накачки-дослідження) (рис 1.6). Суть його полягає в наступному: спочатку імпульс малої інтенсивності, що циркулярно поляризований, створює нерівноважні спін-орієнтовані електрони та дірки та створює макроскопічну

спінову поляризацію. В той же час до зразка прикладають поперечне магнітне поле \mathbf{B} , таким чином макроскопічна поляризація починає рухатись навколо напрямку поля. На мікроскопічному рівні одиничного спіна, обертання пов'язане з когерентною суперпозицією двох рівнів спінів, розділених магнітним полем. Оптично створена поляризація та її обертання може бути виміряні коротким імпульсом лінійно поляризованого світла завдяки обертанню площини поляризації (ефект Фарадея) після проходження через зразок.

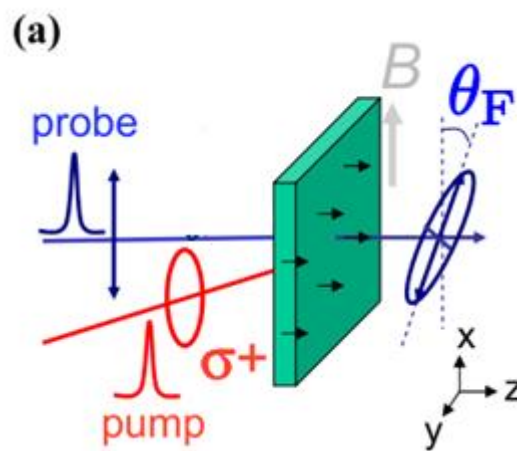


Рисунок 1.6 - Схематичне зображення дослідження стану спінів probe-pump методом

Висновки до розділу

У цьому розділі було розглянуто класифікація оптичних поляризаційних ефектів, що виникають при розповсюдженні електромагнітного випромінювання в анізотропному кристалі, розглянули причини, що можуть викликати цю анізотропію, а також ефекти двопроменезаломлення та дихроїзму. Вони, в свою чергу, можуть поділятися на лінійну та циркулярну.

Також був розглянутий ефект Фарадея. Було розглянуто історія його відкриття, його математичне та фізичне інтерпретування. Для більш глибокого розуміння також був описаний ефект Зеемана, що має

безпосередній зв'язок з ефектом Фарадея. Як було показано у відповідному розділі, якщо магнітне поле прикладене вздовж розповсюдження світла, електрони починають рухатись по колу і перевипромінювати світло з лівою, або правою поляризацією, але з різною швидкістю, що на виході призведе до повороту площини поляризації. В кінці був зроблений огляд застосування ефекту Фарадея для дослідження матеріалів. Судячи з цього огляду та кількості наукових статей, що присвячені цій темі, можна зробити висновок, що це є досить перспективною сферою досліджень. Особливо з огляду на те, що дослідження знаходяться в області сучасних напрямків (наноматеріали, спінроніка та т.п.).

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА ЇЇ ОСОБЛИВОСТІ

2.1 Конструкція фотопружного модулятора поляризації

Явище фотопружності полягає в тому, що ізотропні (оптично прозорі) матеріали під впливом механічної напруги стають анізотропним (двопроменезаломлюючими). Таким чином, принцип дії двопроменезаломлюючого модулятора на фотопружності такий же, як і електрооптичних [3, 20]:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n \cdot L \quad (2.1)$$

Найбільш ефективна конструкція фотопружного модулятора поляризації, вперше застосованого в методі модуляційної еліпсометрії [21], показана на рис. 2.1. Модулятор має найменшу кількість з'єднань і складається з двох пластинок.

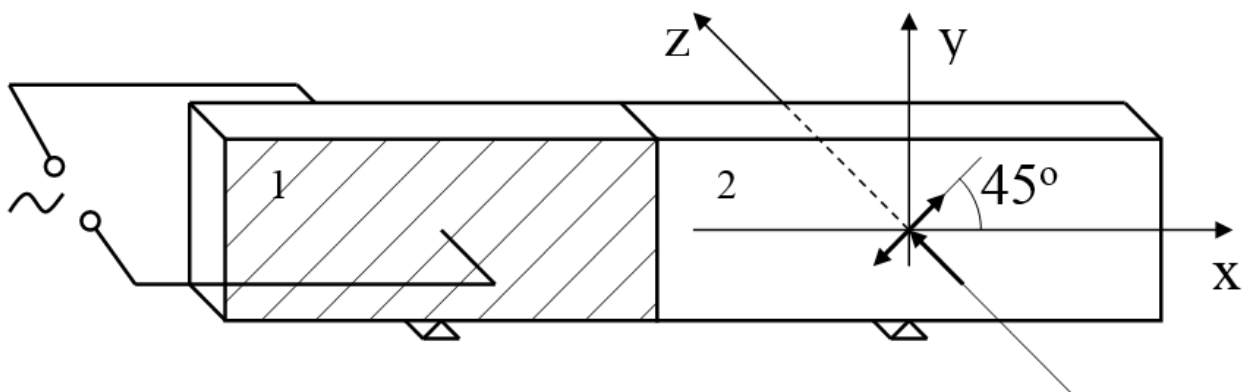


Рисунок 2.1 - Зовнішній вигляд фотопружного модулятора поляризації:

- 1 - резонатор із кристалічного кварцу;
- 2 - активний елемент з плавленого кварцу.

Перша з них виготовлена з кристалічного кварцу Х-зрізу, і є електромеханічним резонатором, при якому основним типом коливань є поперечна мода. Розмір резонатора в напрямку коливань дорівнює половині довжини акустичної хвилі в цьому напрямку на резонансній частоті. Цей розмір пов'язаний з відстанню між електродами, які і визначає частоту власних коливань. До резонатору на акустичному контакті приєднана пластинка, яка під впливом одновісної деформації стиснення-розтягування стає фазовою, з динамічно змінюваною величиною фазового затримки. Ця пластинка виготовляється з ізотропного матеріалу, який прозорий в діапазоні довжин хвиль, що цікавить дослідника. При виборі матеріалу необхідно керуватися ще декількома критеріями. Будь-який оптичний матеріал має свою власну константу фотопружності, яка обумовлює величину механічної напруги необхідної для отримання потрібного зсуву фаз на заданій довжині хвилі світла. Залежність, що характеризує зсув фаз має вигляд:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} C \cdot \sigma \cdot L \quad (2.2)$$

σ - напруга в пластині;

λ - довжина хвилі випромінювання в речовині;

L - розмір пластинки в напрямку поширення світла;

C - константа фотопружності.

Для більшості матеріалів величина C зменшується з ростом λ за умови, що власні смуги поглинання цих середовищ розташовані в області спектра з довжиною хвилі, меншою ніж λ . Отже матеріал, обраний для виготовлення активного елементу модулятора, повинен мати якомога більше значення показника заломлення і фотопружної константи C ($C = \xi_{\lambda} \cdot \epsilon_{\mu}$, де ξ_{λ} - тензор

діелектричної проникності, ϵ_{μ} - тензор деформації). Необхідно також звертати увагу на такі властивості матеріалу, як оптична однорідність, хімічна стійкість, механічна міцність і ряд інших. Зазначеним умовам, які суперечливі і несумісні в одному матеріалі, найбільш повно задовольняє плавлений кварц. Вирішальним аргументом в даному випадку є те, що оптична прозорість цього матеріалу добре узгоджується зі спектральним діапазоном фундаментального поглинання в таких напівпровідниках, як германій, кремній, арсенід галію. Розміри поперечного зрізу фазової пластинки, виходячи з умов приєднання, такі ж, як і у резонатора. А її довжина повинна дорівнювати половині довжини хвилі звуку на частоті резонансу, швидкість якої в плавленому кварці є ізотропною. Власні частоти резонатора і фазової пластинки повинні дорівнювати один одному, проте на практиці вони відрізняються через помилки визначення швидкостей звуку в речовинах, з яких виготовлені пластинки, і через неточності виготовлення елементів. Клей, яким скріплені половини модулятора, мало впливає на добротність резонансної системи, оскільки межа між ними припадає на вузол стоячої хвилі деформації.

2.2 Фізичний принцип функціонування модулятора поляризації на основі фотопружного ефекту

Фотопружний модулятор, конструкція якого описана в попередньому підрозділі, працює наступним чином. До пластини кристалічного кварцу прикладається змінна напруга, і змінне електричне поле, що виникло в ньому, збуджує в пластині резонансні коливання внаслідок п'єзоелектричного ефекту. Виникає стояча хвиля стиснення-розтягування, яка створює в динамічній фазовій платівці пружну одновісну знакозмінну деформацію. Згідно зі знакозмінної деформації в пластинці створюється еліптична індикатриса оптичних властивостей. Головні осі еліпса

співпадають з осями пластинки, і на протязі одного періоду вони змінюються місцями. При одновісній деформації просторове зміщення довільної точки активного елементу вздовж осі X визначається з виразу:

$$\sigma = \sigma_0 \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda_p}\right) \cdot \sin(\omega t) \quad (2.3)$$

σ_0 - початковий зсув довільної точки по координаті x ;

λ_p - довжина акустичної хвилі в плавленому кварці;

ω - частота його поздовжніх коливань.

Відповідне механічне напруження пропорційно $\frac{\partial \sigma}{\partial x}$, тобто $\cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda_p}\right)$, і,

таким чином, має максимальне значення в центрі пластини ($x = 0$).

Так як величина двопронезаломлення пропорційна напрузі, то вона змінюється в часі, як $\sin(\omega t)$. Величина змінного двопронезаломлення, в свою чергу, задає величину фазової затримки δ , відповідно до виразу (2.1). При функціонуванні модулятора величину затримки можна описати рівнянням

$\Delta = \delta_0 \cdot \sin(\omega t)$, де ω - власна частота модулятора, δ_0 - затримка, що встановлюється напругою живлення кварцового резонатора (відповідає чверті або половині довжини хвилі). Таким чином, в момент часу $t = \frac{(2n+1)T}{2}$, (де $n = 0, 1, 2, \dots$, T - період модуляції) модулятор, стає чверть

або півхвильовою фазовою пластинкою в залежності від заданої величини. Наприклад, припустимо, що на модулятор падає лінійно поляризоване світло під кутом 45° до його осей, як показано на рис. 2.1, а модулятор працює в режимі чвертьхвильової пластинки. Тоді, в зазначені моменти часу, на виході

з модулятора різниця фаз між двома лінійними ортогональними компонентами E_x і E_y , на які можна розкласти падаюче випромінювання дорівнюватиме $\pi/2$ (рис. 2.2 (а)), а сума цих компонент дасть циркулярну поляризацію (рис. 2.2 (б)). Слід зазначити, що для зміни лінійної поляризації її азимут повинен бути під кутом до осей пластинки активного елементу (кут 45° є оптимальним). В іншому випадку площина поляризації буде збігатися з однією з осей індикатриси оптичних властивостей, що означає відсутність модуляції поляризації.

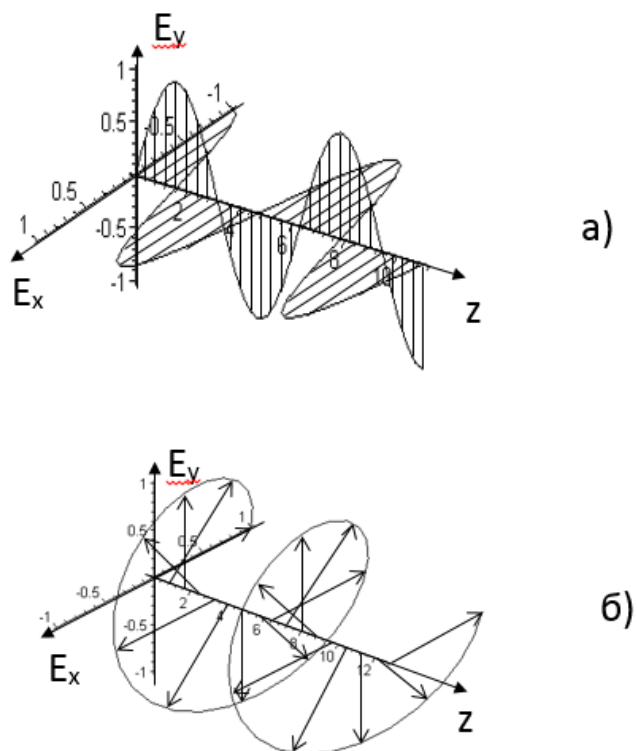


Рисунок 2.2 - Ілюстрація складання векторів двох гармонічних і когерентних хвиль, що розрізняються фазою $\delta_0 = \pi/2$ (а), і утворення однієї циркулярно поляризованої хвилі (б)

На рис. 2.3 схематично показані всі можливі варіанти роботи фотопружного модулятора. На ньому показано залежність від часу механічної напруги в центрі пластини з плавленого кварцу при двох

значеннях σ_{\max} , які зіставлені з діаграмами зміни в часі стану поляризації вихідного випромінювання.

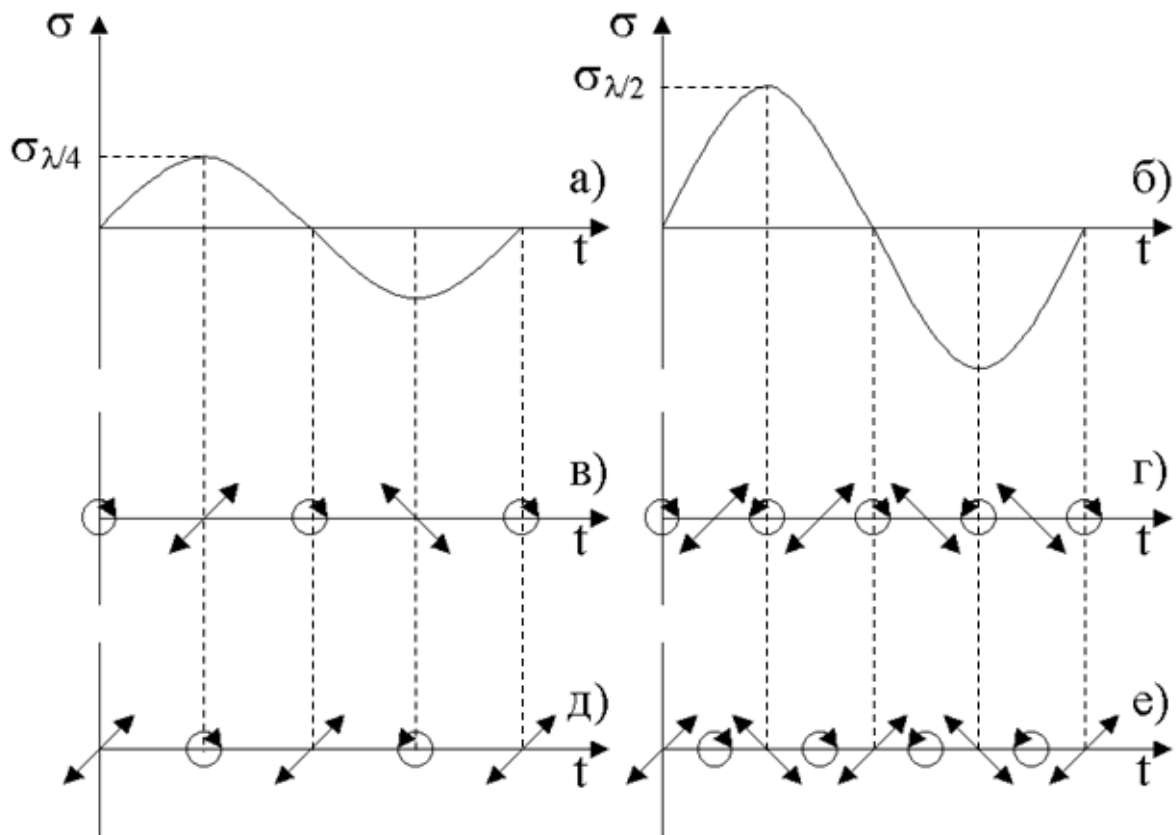


Рисунок 2.3 - Залежність від часу величини механічної напруги і станів поляризації світла, що пройшло через модулятор при двох значеннях σ_{\max} :

а) $\sigma_{\max} \Rightarrow \lambda/4$; б) $\sigma_{\max} \Rightarrow \lambda/2$, і при різних початкових станах поляризації випромінювання: в), г) циркулярна; д), е) лінійна

Розглянемо детально кожен малюнок. По-перше, відзначимо, що рис. 2.3 (а), 2.3 (в) і 2.3 (д) відносяться до такого режиму роботи модулятора, коли максимальна напруга в центрі активного елементу модулятора σ_m відповідає умові чвертьхвильової фазової пластинки. Його зміна в часі на протязі одного періоду зображена на рис. 2.3 (а). Залежно від початкового стану поляризації випромінювання є два випадки. Якщо світло циркулярно поляризоване, то в моменти періоду, коли $\sigma = \pm \sigma_m$, циркулярна поляризація перетвориться в лінійну (рис. 2.3 (в)). У зв'язку з тим, що деформація

пластинки в ці моменти часу має протилежні знаки, азимути лінійних поляризації взаємно перпендикулярні. У моменти періоду, коли $\sigma = 0$, поляризація випромінювання не змінюється, і воно залишається поляризованим циркулярно. У проміжні моменти часу світло, що вийшло з модулятора буде еліптично поляризованим, зі змінною в залежності від значення механічного напруження величиною еліптичності. Такі ж міркування справедливі для ситуації, коли світло спочатку поляризований лінійно. Як вже зазначалося для перетворення лінійно поляризованої хвилі, її площина поляризації повинна складати з осями модулятора кут 45° , який є оптимальним. В цьому випадку поляризація протягом періоду двічі змінюється від лінійної через еліптичну до циркулярної і назад (рис. 2.3 (д)). Причому циркулярні поляризації будуть ортогональними, напрямок обертання електричного вектора буде залежати від знаку механічної напруги.

Таким же чином проводиться розгляд рис. 2.3 (б), 2.3 (г) і 2.3 (е), які ілюструють роботу модулятора в півхвильовому режимі. На рис. 2.3 (б) показано зміну в часі протягом періоду величину механічної напруги, коли її максимальне значення відповідає умові півхвильової фазової пластинки. Якщо на модулятор падає циркулярно поляризоване випромінювання (нехай кінець електричного вектора обертається за годинниковою стрілкою), то в моменти часу, коли $\sigma = \pm \sigma_m$ правоциркулярна поляризація перетвориться в лівоциркулярну поляризацію (рис. 2.3 (г)). Це перетворення відбувається наступним чином: правоциркулярна поляризація становиться спочатку через праву еліптичну поляризацію лінійною, а потім лінійна перетворюється через ліву еліптичну поляризацію в лівоциркулярну. Перетворення циркулярно поляризованої хвилі в ортогональну і назад відбувається два рази за період. Причому, знак механічної напруги впливає тільки на поляризацію хвилі в проміжних станах, а точніше на азимут еліптичної і лінійної поляризацій. Коли на модулятор падає лінійно поляризоване світло (рис. 2.3 (е)), маємо схожу ситуацію. Лінійна поляризація через еліптичну стає циркулярною, а потім знову через еліптичну, але вже з азимутом перпендикулярним площині

поляризації початкової хвилі в ортогональну лінійну. Як і в попередньому випадку, перетворення лінійно поляризованої хвилі в ортогональну і назад відбувається два рази за період.

Таким чином, описаний фотопружний модулятор поляризації може з рівним успіхом використовуватися для дослідження будь-якого поляризаційного ефекту, класифікація яких була дана в розділі 1.

Слід зазначити ще одну особливість використання даного модулятора, внаслідок співвідношення $\delta \approx 1/\lambda$ (див. рівняння 2.1), а також внаслідок дисперсії тензора діелектричної проникності ξ_λ , модулятор є хроматичним елементом оптичної схеми. Тому для компенсації спектральної залежності глибини модуляції, тобто для збереження її постійної величини, необхідно при проведенні досліджень в широкому діапазоні довжин хвиль змінювати величину деформації $\epsilon_\mu \approx \lambda$. Практично це можна зробити, змінюючи напругу живлення резонатора з кристалічного кварцу.

З огляду на все вище викладене, був виготовлений і випробуваний фотопружних модулятор світла, який має наступні основні параметри:

- спектральний діапазон модулюючого випромінювання 0.2-2.0 мкм;
- частота модуляції - 60 кГц; 120кГц;
- відносна величина зміни інтенсивності модулюючого випромінювання 10^{-4} ;
- напруга живлення резонатора в діапазоні випромінювання при глибині модуляції $\delta = \pi/2$ дорівнювало 50-60 В;
- розміри:
 - 1) резонатора з кристалічного кварцу 10x15x45 мм;
 - 2) активного елемента з плавленого кварцу 10x15x50 мм.

2.3 Використання фотопружного модулятора для повного поляризаційного аналізу довільно поляризованої хвилі

Як добре відомо, поляризація, як стан, будучи просторовою характеристикою хвилі, виражається сукупністю значень - компонентами векторів Максвелла-Джонса або Стокса. Тому поляризаційна модуляція відрізняється від модуляцій інших фізичних величин, що оперують з одним параметром тим, що з її допомогою здійснюється двовимірний вплив на хвилю. Як показує досвід, ця, несуттєва на перший погляд обставина є ускладнюючою у всіх відношеннях. Так, математичний формалізм для опису процесу модуляції поляризації базується на використанні функцій Бесселя, а що стосується інтерпретації отриманих за допомогою поляризаційного методу результатів, то це завдання знаходиться в стані вирішення.

Незважаючи на це поляризаційна модуляція останнім часом все більше звертає на себе увагу дослідників, головним чином завдяки тим досягненням, які отримані при її використанні [22]. При цьому можливості методу залишаються не з'ясованими до кінця, про що свідчать деякі публікації. Так в роботі [23] розгляд процесу модуляції поляризації обмежена окремим випадком, а саме, використанням його для аналізу стану поляризації випромінювання, що поширюється в непоглинаючому середовищі. В цьому випадку негіротропний поворот площини поляризації, що має місце в частково поглинаючому середовищі, залишається неврахованим для повного опису стану поляризації.

Проведемо аналіз процесу поляризаційної модуляції в загальному випадку (еліптична поляризація) і продемонструємо його можливості в здійсненні повного поляризаційного аналізу. Для цього розрахунком на основі матричної оптики покажемо, що при використанні оптичної схеми з модулятором поляризації можливо вимір кожної з компонент вектора Стокса окремо, в тому числі і в разі часткового поглинання світла.

Розглянемо оптичну схему, що складається з лінійного поляризатора, зразка і аналізатора, а також, крім вище перерахованих елементів, ще містить фотопружний модулятор поляризації. Причому, як показано в [23], модулятор, який знаходиться перед аналізатором, виконує разом з ним роль динамічного аналізатора стану поляризації.

При проходженні світлом анізотропного зразка спостерігаються, як уже зазначалося, ефект дихроїзму, пов'язаний з анізотропією показника поглинання, і двопроменезаломлення, пов'язаного в свою чергу з анізотропією показника заломлення. Причому, в результаті дихроїзму відбувається поворот площини поляризації зонduючого випромінювання, а двопроменезаломлення – перетворення лінійної поляризації в еліптичну. В загальному випадку стан поляризації випромінювання при його поширенні в реальних середовищах зазнає складних змін. Визначення результатів цієї зміни є основним завданням поляриметрії. Для її вирішення у вигляді математичного формалізму використовують один з двох варіантів матричного аналізу. Скористаймося варіантом, що базуються на застосуванні вектора Стокса і відповідних йому 4×4 матрицях Мюллера, виходячи з тих обставин, що його компоненти виражаються через безпосередньо вимірювані величини, а саме інтенсивності світла.

В окремих випадках компоненти вектора Стокса мають вигляд [20]:

$[1, \pm 1, 0, 0]$ – Q-компонента, азимут поля вертикальний або горизонтальний;

$[1, 0, \pm 1, 0]$ – U-компонента, азимут $\pm 45^\circ$ відносно осі y ;

$[1, 0, 0, \pm 1]$ – V-компонента з правою чи лівою спіральністю.

Зображення цих станів поляризації та схема розкладання загального стану поляризації на окремі компоненти наведено на рис. 2.4. Із нього видно,

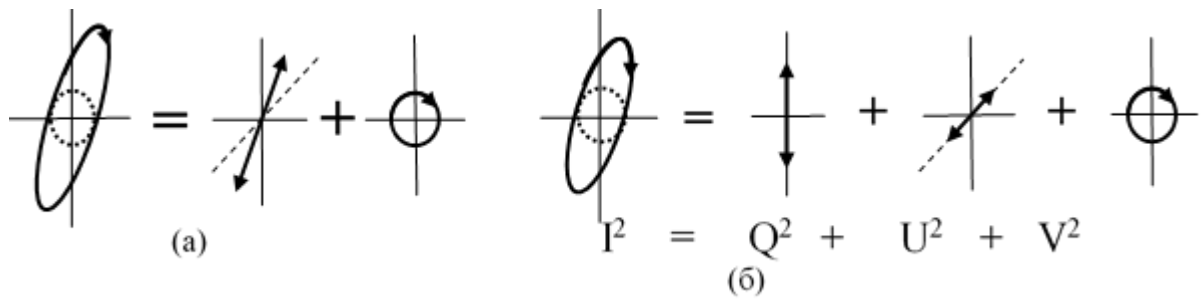


Рисунок 2.4 - Схематична структура еліптичного у загальному вигляді стану поляризації, що містить компоненти вектора Стокса та їх фізичний зміст

що еліптично поляризована хвиля містить циркулярну та лінійну компоненти, на які вона може бути розкладеною. Крім того, у загальному випадку лінійна компонента з довільним азимутом поля розкладається на дві базові, одна із яких орієнтована вздовж вертикальної (горизонтальної) осі, а друга під кутом $\pm 45^\circ$ до неї.

Зв'язок між компонентами вектора вхідного і вихідного випромінювань описується співвідношенням:

$$S_{\text{вих}} = M_n \cdot M_{n-1} \cdot \dots \cdot M_1 \cdot S_{\text{вх}} \quad (2.4)$$

де M_n, M_{n-1}, \dots, M_1 матриці Мюллера елементів схеми в порядку проходження через них випромінювання. Будемо розглядати перетворення поляризації випромінювання при його проходженні крізь динамічний аналізатор, що складається з модулятора і поляризатора. Скористаємося табличними значеннями матриць Мюллера для ідеального лінійного поляризатора і фазової пластинки в загальному вигляді [24]. Для лінійного поляризатора:

$$M_{\Pi} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & C_2 & S_2 & 0 \\ C_2 & C_2^2 & C_2 S_2 & 0 \\ S_2 & C_2 S_2 & S_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

а для фазової пластинки:

$$M_M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2^2 + S_2^2 \beta & C_2 S_2 (1 - \beta) & -S_2 \mu \\ 0 & C_2 S_2 (1 - \beta) & S_2^2 + C_2^2 \beta & C_2 \mu \\ 0 & S_2 \mu & -C_2 \mu & \beta \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

де $C_2 = \cos 2\theta$, $S_2 = \sin 2\theta$, θ - кут орієнтації площині пропускання поляризатора або швидкої осі фазової пластинки (наприклад ОХ) щодо лабораторних координат, що визначаються оптичною віссю зразка, $\beta = \cos \delta$, $\mu = \sin \delta$, δ - різниця фаз, що набігає при проходженні світла через фазову пластинку (в разі модулятора це динамічно змінювана величина $\delta = \delta_0 \sin(\omega t)$). Врахуємо, що з усіх можливих азимутальних положень модулятора оптимальними (цікавлять дослідника) є тільки два, а саме, коли він орієнтований під кутом $\theta = 0^\circ$, або $\pi/4$. Також врахуємо, що модулятор і наступний за ним поляризатор повинні бути орієнтовані певним чином, а саме кут між площиною пропускання поляризатора і однією з осей пластинки має дорівнювати $\pm \pi/4$. Отже компоненти матриць C_2 і S_2 будуть мати фіксовані значення 0 або ± 1 в кожному конкретному випадку.

Розглянемо спочатку окремі випадки, коли світло, що виходить зі зразка є лінійно або циркулярно поляризованим, а потім загальний випадок еліптично поляризованого світла і покажемо, що за допомогою використання модулятора поляризації можна отримати сигнали, що відповідають кожній з компонент вектора Стокса.

При падінні на модулятор циркулярно поляризованого світла з компонентами вектора Стокса $S = \{I \ 0 \ 0 \ V\}$ його азимутальне положення може бути довільним, візьмемо $\theta = 0^\circ$. Тоді після проходження модулятора світло буде виражатися вектором:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta & \mu \\ 0 & 0 & -\mu & \beta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I \\ 0 \\ 0 \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ 0 \\ \mu V \\ \beta V \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Потім світло проходить крізь поляризатор, який розташований, як уже зазначалося, під кутом $\pi/4$ щодо модулятора. В даному випадку візьмемо $\theta = 45^\circ$, тоді світло, що вийшло описується вектором Стокса такого вигляду:

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I \\ 0 \\ \mu V \\ \beta V \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} I + \mu V \\ 0 \\ I + \mu V \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Як добре відомо, перша компонента вектора Стокса визначає повну інтенсивність світлової хвилі, отже, розписавши μ можна записати інтенсивність випромінювання падаючого на фотодетектор у вигляді:

$$I_{\text{вих}} = (1/2) * [I_0 + V \sin(\delta_0 \sin(\omega t))] \quad (2.9)$$

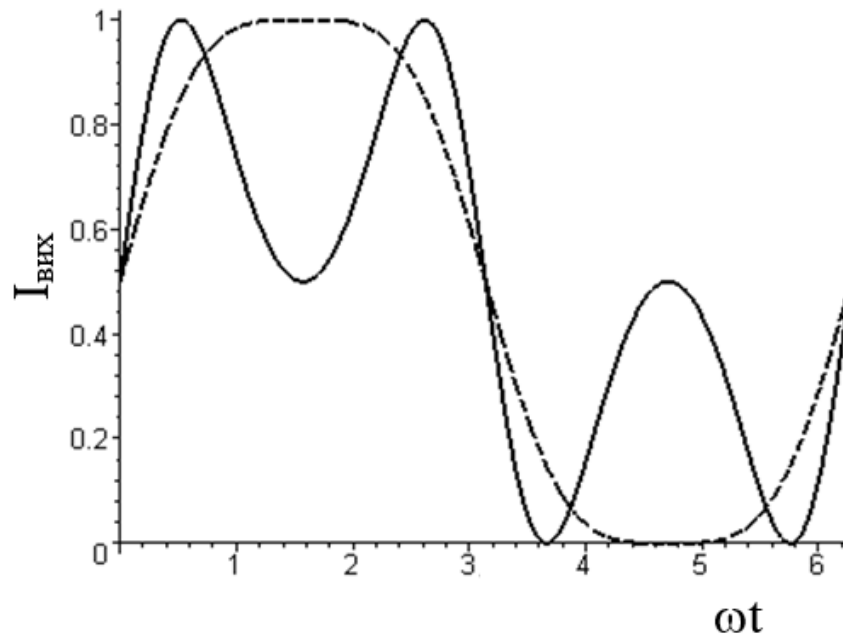


Рисунок 2.5 - Розраховані відповідно до (2.9) інтенсивності $I_{вих}$ циркулярно поляризованого випромінювання, що пройшло модулятор і поляризатор, протягом одного періоду

На рис. 2.5 показано, як в цьому випадку змінюється інтенсивність $I_{вих}$ світла, що пройшло модулятор і поляризатор, на протязі одного періоду його роботи, якщо $\delta_0 = \pi/2$ - штрихова лінія, і якщо $\delta_0 = \pi$ - суцільна.

Тепер розглянемо випадок, коли зі зразка виходить лінійно поляризоване випромінювання. Модулятор перетворює лінійно поляризоване світло при такому його розташуванні, що площина поляризації знаходиться під кутом в 45° до осей модулятора (рис. 2.1). Припустимо, вектор Стокса вихідного стану випромінювання має вигляд $S = \{I \ 0 \ U \ 0\}$, тоді розташування модулятора і поляризатора має бути таким же, як і в попередньому випадку, а добуток тих же матриць на даний вектор Стокса дає інтенсивність світла, що пройшло у вигляді:

$$I_{вих} = (1/2) * [I_0 + U \cos(\delta_0 \sin(\omega t))] \quad (2.10)$$

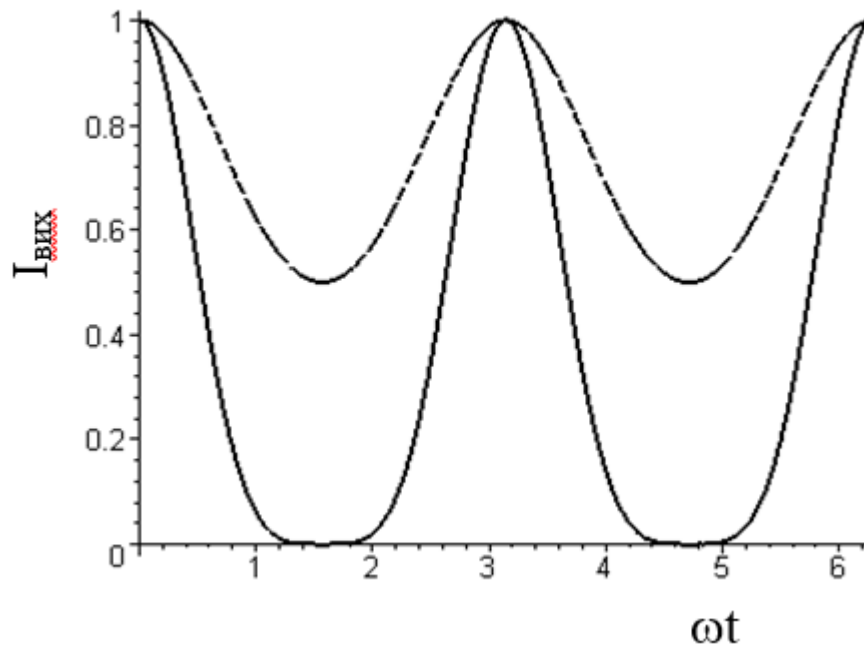


Рисунок 2.6 - Розраховані відповідно до (2.10) інтенсивності $I_{\text{вих}}$ лінійно поляризованого світла, що пройшло модулятор і поляризатор, протягом одного періоду

Рис. 2.6 демонструє зміну інтенсивності падаючого в цьому випадку на детектор світла за один період роботи модулятора в чвертьхвильовому режимі $\delta_0 = \pi/2$ - штрихова лінія і в півхвильовому режимі $\delta_0 = \pi$ - суцільна.

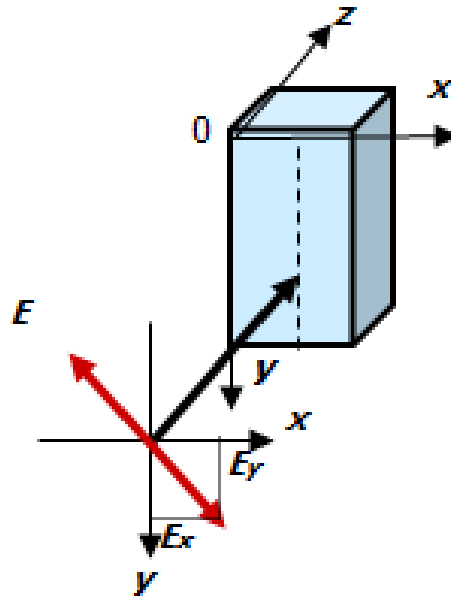


Рисунок 2.7 – Азимутальне положення зразка відносно падаючого поляризованого випромінювання

Перейдемо до розгляду загального випадку - із зразка виходить еліптично поляризоване світло з вектором Стокса: $S = \{I \ Q \ U \ V\}$. У даній ситуації азимутальне положення динамічного аналізатора має дуже велике значення. Якщо для модулятора $\theta = 0^\circ$, а для поляризатора відповідно $\theta = 45^\circ$, то в результаті добутку матриць поляризатора (2.5) і модулятора (2.6) на вектор Стокса отримуємо:

$$I_{\text{вих}} = (1/2) * [I_0 + U \cos(\delta_0 \sin(\omega t)) + V \sin(\delta_0 \sin(\omega t))] \quad (2.11)$$

Як видно з виразу (2.10), в даному випадку Q компонента вектора Стокса, що збігається з однією з осей модулятора, не модулюється і не дає вкладу в сигнал. Очевидно, що для того щоб зареєструвати Q компоненту необхідно динамічний аналізатор повернути на кут $\theta = 45^\circ$. Тоді при ідентично поляризованому світлі що вийшов з зразка, $S = \{I \ Q \ U \ V\}$:

$$I_{\text{вих}} = (1/2) * [I_0 + Q \cos(\delta_0 \sin(\omega t)) + V \sin(\delta_0 \sin(\omega t))] \quad (2.12)$$

Як бачимо формули (2.11) і (2.12) відрізняються тільки заміною компоненти U на Q в другому доданку.

У всіх розглянутих випадках взаємне розташування фотопружного модулятора і поляризатора спеціально підбиралися таким чином, щоб в виразі для світла, що вийшло виходила сума. З значень матриць Мюллера очевидно, що при повороті поляризатора на 90° замість суми вийде різниця, однак це не вплине на величину інтенсивності, зміниться лише фаза її зміни.

Викладене вище дозволяє зробити кілька висновків. Перш за все, в загальному випадку еліптично поляризоване світло легко за допомогою поляризаційної модуляції розділити сигнали, що залежать від величин кожної з компонент вектора Стокса. Так сигнал, що визначається циркулярною компонентною V, реєструється на частоті резонатора, а той, що залежить від лінійної - на подвоєній. Сигнали ж лінійних компонент Q і U поділяються азимутним положенням модулятора. Та з лінійних компонент, площа поляризації якої збігається з будь-якою віссю модулятора, не перетвориться модулятором, отже, не дає вкладу в реєстрований сигнал.

Крім того, при реєстрації циркулярно поляризованого світла робота модулятора в півхвильовому режимі не вигідна. В цьому випадку в результаті перевищення глибини модуляції виникає сигнал, що містить вищі гармоніки. При цьому в інтенсивності світла, що описується виразом (2.9), цей сигнал є компонентою, що спотворює гармонійну (з частотою ω) залежність (рис. 2.5 штрихована лінія). А ось при реєстрації лінійно поляризованого випромінювання потрібен півхвильовий режим модулятора, бо, як видно з рис. 2.6, в цьому випадку корисний сигнал збільшується. Випробування експериментального зразка модулятора поляризації підтвердили кількісно і якісно результати розрахунку.

Висновки до розділу

В цьому розділі було детально розглянуто головну частину дослідної установки, що спроможна до повного Стокс поляриметричного аналізу, а саме модулятора поляризації. Показали, що фотопружний модулятор поляризації, з огляду на суперечливі вимоги, що висувуються до модулятора поляризації, є одним з найкращих варіантів. До цих вимог відносяться: необхідність функціонування в широкому спектральному діапазоні випромінювань; можливість перебудови частоти модуляції; можливість регулювання глибини модуляції (величин кутів еліптичності або орієнтації); малі значення керованої потужності; хімічну, механічну стійкість і міцність, і ряд інших. Познайомились з фізичним принципом його функціонування та конструкцією.

Провели аналіз процесу поляризаційної модуляції в загальному випадку (еліптична поляризація) і продемонстрували його можливості в здійсненні повного поляризаційного аналізу. Для цього за розрахунком на основі матричної оптики показали, що при використанні оптичної схеми з модулятором поляризації можливо вимір кожної з компонент вектора Стокса окремо, в тому числі і в разі часткового поглинання світла.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТУ ФАРАДЕЯ В УМОВАХ НЕОДНОРІДНОГО ПОТЕНЦІАЛУ В ТВЕРДОМУ ТІЛІ

3.1 Дослідна установка

В цьому розділі опишемо дослідну установку, роботу кожного із її складових та розглянемо принцип її роботи взагалі.

Спрощену схему дослідної установки зображено на рис. 3.1.

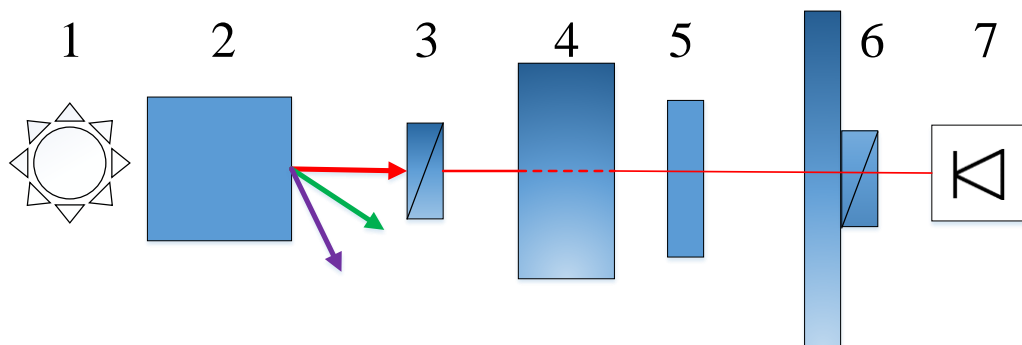


Рисунок 3.1 - Оптична схема установки:

1. джерело випромінювання;
2. монохроматор;
3. поляризатор;
4. зразок;
5. фазова пластинка;
6. аналізатор поляризації;
7. фотодіод.

Джерелом випромінювання слугує галогенова лампа рис. 3.1 (1).

Далі проходить крізь дифракційний монохроматор МДР-23 рис.3.1 (2). Монохроматор МДР-23 призначений для виділення монохроматичного

випромінення в широкому спектральному діапазоні (200 – 2000 нм). Оптична схема монохроматора приведена на рис. 3.2.

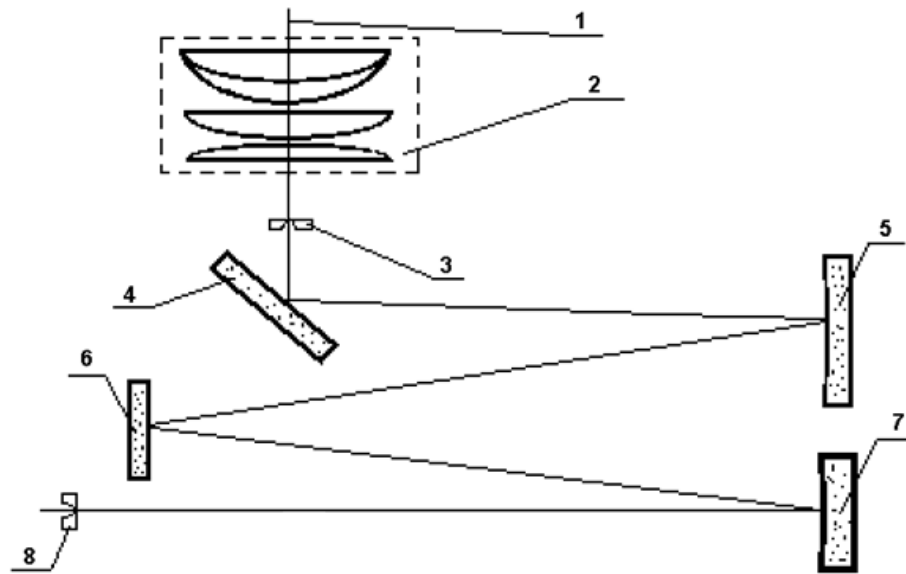


Рисунок 3.2 - Оптична схема монохроматора МДР-23

1. джерело світла;
2. конденсатор;
3. вхідна щілина монохроматора;
4. поворотне дзеркало;
5. дзеркальний сферичний об'єктив;
6. дифракційна решітка;
7. дзеркальний сферичний об'єктив;
8. вихідна щілина.

Джерело світла 1 (в нашому випадку галогенова лампа) через конденсор 2 опромінює вхідну щілину 3. Поворотне дзеркало 4 и дзеркальний сферичний об'єктив 5, в фокальній площині якого розміщена вхідна щілина, направляють паралельний пучок на дифракційну решітку 6. Після дифракції паралельний пучок променів фокусуються дзеркальним сферичним об'єктивом 7 на вихідну щілину 8. При цьому, змінюючи кут

повороту дифракційної решітки можна отримати різну довжину хвилі вихідного випромінювання.

Поворот можна здійснювати як в ручному режимі, так і автоматично за допомогою вбудованого крокового двигуна [25].

Таким чином, на виході із монохроматора ми отримуємо світло однієї довжини хвилі, або ж, якщо бути реалістом, то світло з дуже малим розкидом частот. Далі воно потрапляє на поляризатор Франка-Ріттера рис. 3.1 (3). Це потрібно для того, щоб на зразок падало лінійно поляризоване світло рис.3.1, так як з монохроматора виходить світло з довільною поляризацією.

Таким чином, монохроматичне та поляризоване світло падає на зразок рис.3.1.(4), Зразок розміщений в магнітному полі таким чином, що лінії магнітного поля орієнтовані паралельно світловому потоку. В наслідок виникнення ефекту Фарадея відбувається поворот площини поляризації лінійно поляризованої хвилі.

Реєстрація вказаного повороту площини поляризації методом модуляційної поляриметрії можлива у двох варіантах. У першому варіанті, чвертьхвильова фазова пластинка рис.3.1.(5) розташована після зразка і була орієнтована таким чином, що її швидка вісь збігалася із площиною поляризації випромінювання падаючого на зразок. Роль фазової пластинки полягала в тому, що вона перетворювала лінійно поляризоване випромінювання в еліптично поляризоване. Величина циркулярної компоненти у складі еліптичного стану поляризації залежить від кута між однією із осей пластинки та площини поляризації. Тому використання фазової пластинки дає можливість отримати лінійну залежність між сигналом фотодетектора та величиною циркулярної компоненти, а значить величиною ефекту Фарадея, якщо згаданий кут не перевищує деякої величини. У другому варіанті чвертьхвильова фазова пластинка відсутня, а мірою кута фарадеївського повороту є лінійна компонента вектора Стокса

Після цього, світло падає на аналізатор рис.3.1.(6), що складається з поляризатора та модулятора поляризатора. Принцип роботи та призначення цієї частини схеми було приведено в розділі 2. Для кожного варіанта оптичної схеми можна підібрати певний режим роботи модулятора. В першому варіанті азимутальне положення динамічного аналізатора не важливе, а корисний сигнал пропорційний куту повороту площини поляризації реєструється на одиничній частоті. У другому, модулятор встановлюється таким чином, що одна з його осей співпадає з площиною поляризації випромінювання падаючого на зразок, і сигнал пропорційний куту повороту вимірюється на подвоєній частоті модуляції.

В кінці світло потрапляє на фотодіод рис.3.1.(7), та перетворюється в електричний сигнал, що в подальшому використовується для аналізу.

Для виміру додаткових матеріалів використовувалась трохи інша схема, що приведена на малюнку 3.3.

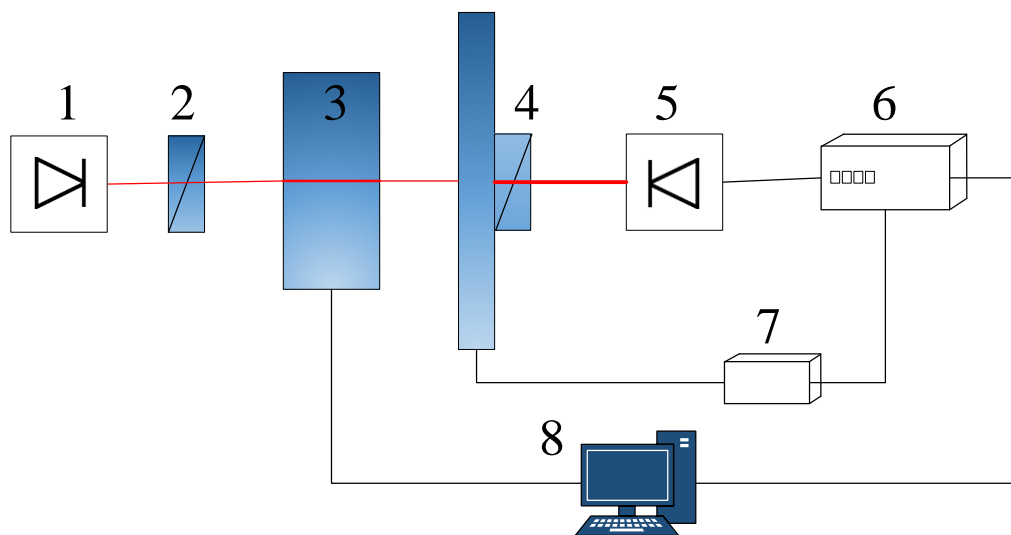


Рисунок 3.3 - Оптична схема установки для дослідження додаткових матеріалів

Позначення на рис. 3.3 [26, 27] :

1. Лазер ЛГН-113, довжина хвилі випромінювання $\lambda = 0.63$ мкм, виготовлення підприємства «Укрлазер»;
2. поляризатор Рітера-Франка з ісландського шпату;
3. зразок;
4. – дві частини фотопружного модулятора поляризації з лінійним поляризатором.

Основні параметри модулятора:

- спектральний діапазон випромінювання – 400 - 1200 нм;
 - резонансна частота модуляції – 50 кГц;
 - глибина модуляції – 90 град;
 - відносна величина модуляції інтенсивності світла 10^{-4} ;
 - напруга живлення резонатора при глибині модуляції $\delta = \pi/2$ – 40 В;
 - розмір резонатора 10×15×45 мм;
 - розмір активного елемента 10×15×50 мм;
5. фотодіод ФД-9К (кремнієвий);
 6. lock-in-нанольтметр;
 7. джерело напруги опорного сигналу та живлення МП;
 8. ПК.

Реєстрація ефектів відбувалась за допомогою комбінації синхронно-фазового нанольтметра Unipan типу 232В (lock-in-нанольтметр) СД та селективних нанольтметрів Unipan типу 237 (Рис. 3.4).

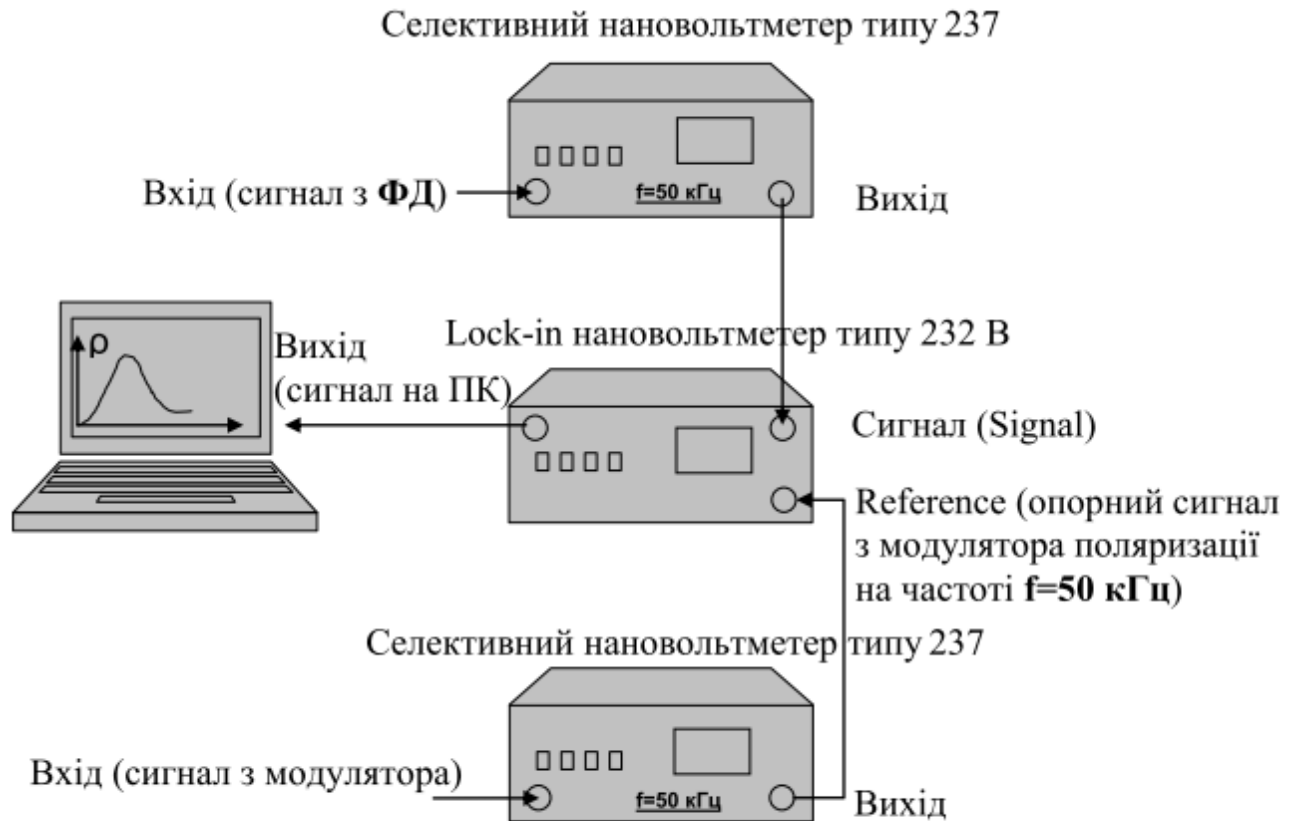


Рисунок. 3.4 Блок-схема реєстрації інтенсивності параметра поляризаційної різниці.

На вхід селективного нановольтметра з фотодетектора надходить електричний сигнал, який потім на частоті 50 кГц або 100 кГц передається на вхід синхронно-фазового нановольтметра. На вхід іншого селективного нановольтметра з генератора Γ модулятора надходить електричний сигнал, який на потрібній частоті передається на опорний канал (вхід Reference) синхронно-фазового нановольтметра. Тоді lock-in-нановольтметр типу 232 реєструє сигнал на частоті, яка визначається частотою опорного сигналу Γ , на рівні значно нижчому власних шумів. Відзначимо, що частота опорного періодичного сигналу з модулятора стану поляризації ідентична частоті вимірюваного сигналу. Вихідний

сигнал з синхронного-фазового детектору спрямовується на програмно-апаратний комплекс ПАК, де здійснюється запис та обробка даних.

Програмно-апаратний комплекс [26, 27] призначений для забезпечення роботи спектрального гоніометричного комплексу під керуванням персонального комп'ютера (ПК) з метою автоматизації вимірів спектрів напівпровідників, металів та композитів у діапазоні довжин хвиль від 400 до 2000 нм. Він складається з плати сполучення до ПК, цифро-аналогового (ЦАП) і аналого-цифрового (АЦП) модуля перетворювачів, модуля керування кроковим двигуном розгортки з пристроєм знімання сигналу фотоприймача, програмного забезпечення роботи комплексу і проведення експериментів. Блок схема комплексу наведена на рис. 3.5. Плата сполучення розміщена в системному блоці ПК і забезпечує сполучення зовнішніх пристроїв із системною шиною ISA ПК, модуль (ЦАП-АЦП) забезпечує перетворення вхідних аналогових сигналів у цифрову форму, а також перетворення вихідних сигналів ПК в аналогову форму для керування.

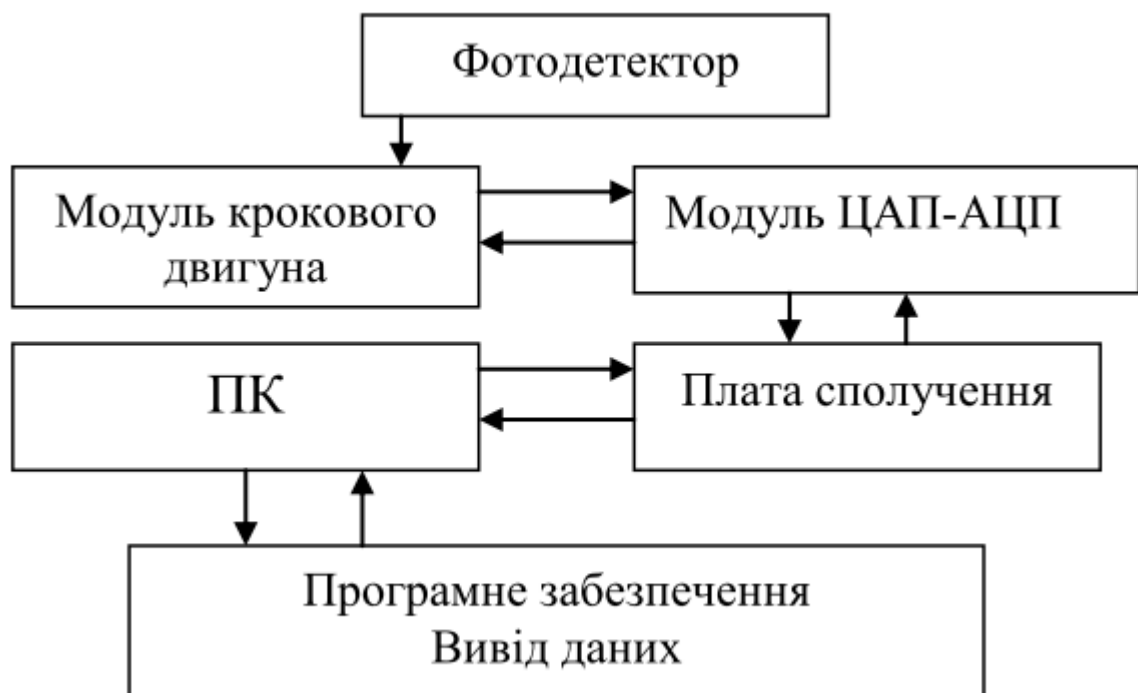


Рисунок. 3.5. Блок-схема ПАК зовнішніми пристроями.

Модуль керування кроковим двигуном живиться змінною напругою 220 В 50 Гц і забезпечує керування кроковим двигуном монохроматора або просторової розгортки в ручному режимі (включення, зупинка крокового двигуна, зміна швидкості й напрямку його обертання), керування кроковим двигуном за допомогою ПК. Програмне забезпечення призначене для одержання спектрограм гоніометру під керуванням ПК в автоматизованому режимі. Графіки зберігаються в текстовому форматі. Розширенню файлів даних привласнюється значення «dat», що відповідає професійній програмі обробки графіків “ORIGIN”.

3.2 Дослідні зразки

Основним дослідним зразком в даній роботі є кремній, тому що на сьогоднішній він грає ключову роль в електронній промисловості та інших галузях. Другою причиною використання кремнію в якості дослідного зразка полягає в тому, що він є одним з найбільш дослідженим матеріалом, що дозволяє відпрацювати методику вимірювання. Для більш кращого розуміння отриманих результатів треба привести хімічні, електрофізичні та фізичні властивості кремнію. Також проводились і додаткові дослідження інших зразків, а саме – алюмосилікатної склокераміки та неодимового скла. Вони також широко застосовуються. Метою проведення додаткових вимірів було дослідження зовнішніх впливів на достовірність вимірювальних величин у матеріалах, та дослідити вплив зовнішніх чинників на достовірність отриманих результатів при використанні модуляційної поляриметрії.

3.2.1 Кремній

Фізичні та електрофізичні властивості кремнію.

Кристалічна решітка кремнію кубічна гранецентрована типу алмаз, параметр $a = 0,357$ нм (при високому тиску отримані й інші поліморфні модифікації кремнію), але за рахунок більшої довжини зв'язку між атомами Si-Si в порівнянні з довжиною зв'язку C-C твердість кремнію значно менше, ніж алмазу. Кремній крихкий, тільки при нагріванні вище $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ він стає пластичною речовиною. Цікаво, що кремній прозорий для інфрачервоних променів починаючи з довжини хвилі $1,1\text{ мкм}$.

Елементарний кремній в монокристалічній формі є непрямозонним напівпровідником. Ширина забороненої зони при кімнатній температурі становить $1,12\text{ еВ}$, а при $T = 0\text{ К}$ складає $1,21\text{ еВ}$. Концентрація власних носіїв заряду в кремнії при нормальних умовах становить близько $1,5 \cdot 10^{10}\text{ см}^{-3}$.

На електрофізичні властивості кристалічного кремнію великий вплив мають домішки, що містяться в ньому. Для отримання кристалів кремнію з дірковою провідністю в кремній вводять атоми елементів III-ї групи, таких, як бор, алюміній, галій, індій. Для отримання кристалів кремнію з електронною провідністю в кремній вводять атоми елементів V-ї групи, таких, як фосфор, миш'як, сурма.

При створенні електронних приладів на основі кремнію задіюється переважно приповерхневий шар матеріалу (до десятків мікрон), тому якість поверхні кристала може робити істотний вплив на електрофізичні властивості кремнію і, відповідно, на властивості готового приладу. При створенні деяких приладів використовуються прийоми, пов'язані з модифікацією поверхні, наприклад, обробка поверхні кремнію різними хімічними агентами.

Застосування кремнію в електротехніці

В даний час в усьому світі виробляється близько 15 тис. тон кремнію щорічно (Японія, США, Німеччина). Кремній є основним матеріалом твердотільної електроніки. Це базовий матеріал мікроелектроніки, який споживає 80% напівпровідникового кремнію. Кремній становить 70% від всіх споживаних мікроелектронікою матеріалів. Проте, помітну частку в загальному обсязі випуску напівпровідникових виробів становить кремнієві дискретні прилади - це випрямні, імпульсні, НВЧ діоди, біполярні, польові транзистори. І на відміну від германію, робоча температура кремнію в електронних компонентах лежить в діапазоні від -60 до +200 °С, це зіграло величезну роль в його застосуванні, тому що більшість сучасних процесорів працюють на температурах до 100 °С. Монокристалічний кремній є основним матеріалом і для виготовлення приладів силової електроніки - це потужні діоди, тиристори, транзистори, інтегральні схеми. Вони застосовуються при передачі електроенергії на великі відстані, в енергоємних виробництвах, наприклад, в металургійному та хімічному, в системах електроживлення. Кремній широко застосовується для виробництва фоточутливих приладів, фотодіодів і фототранзисторів, різноманітних сенсорних пристроїв, прецизійних мікромеханічних систем. Важливу роль кремній відіграє в динамічній сонячній енергетиці. Більше 90% всіх сонячних елементів виготовляються з кристалічного кремнію. Перспективним напрямком є кремнієва оптоелектроніка. Тут перш за все слід зазначити світловипромінювальні прилади та фотодетектори, що інтегровані в кремнієву технологію.

3.2.1 Алюмосилікатна склокераміка

Склокераміка - склокристалічні матеріали, отримані об'ємною кристалізацією скла, і складаються з однієї або декількох кристалічних фаз, рівномірно розподілених в склоподібній фазі.

Склокераміка представляє широкий інтерес завдяки своїм властивостям. Вона має малу щільність (вона легше алюмінію), високу механічну міцність, особливо на стиск, твердістю, жароміцність, термічну стійкість, хімічну стійкість та інші цінні властивості. Склокераміка має більшість позитивних властивостей, які є у скла, в тому числі і технологічність.

Існує склокераміка зі спеціальними властивостями: прозорі, магнітні, напівпровідникові, радіопрозорі та інше.

Твердість більшості склокерамічних матеріалів становить 6,5-7 одиниць по Моосу, межа міцності на вигин до 250 МПа, термостійкість до 1000 ° С.

Завдяки різноманітним властивостям склокераміка має безліч застосувань. Застосовується вона для виготовлення деталей, що вимагають міцності і термостійкості (корпуси приладів, шкали, зразкові заходи, підкладки мікросхем і ін.).

Є перспективними будівельними і конструкційними матеріалами (обтічники ракет і надзвукових керованих снарядів, хімічно стійка апаратура, мостобудівні конструкції та ін.).

Широке застосування склокераміка знайшла в астрономічній оптиці, завдяки низькому коефіцієнту температурного розширення.

В даній роботі виміри проводились на зразку алюмосилікатної склокераміки, що являє собою скляну матрицю, в якій знаходяться природні та синтетичні силікати, що містять у складі складні аніони атомів алюмінію і кремнію, тобто алюмосилікати.

3.2.3 Неодимове скло

Неодимове скло виробляється шляхом включення оксиду неодиму (Nd_2O_3) у скляний розплав.

Перше комерційне застосування неодиму полягало в тому, що за допомогою нього можна було надавати склу різноманітні кольори.

Різні смуги поглинання неодиму приводять до зміни кольору скла від різних умов освітлення, червонувато-пурпурний при сонячному освітленні, або при жовтим світлом лампи розжарювання, синій під білим люмінесцентним освітленням, або зеленуватим під трихроматичним освітленням. Це явище зміни кольорів високо цінується. У поєднанні з золотом або селеном з'являються красиві червоні кольори.

Світло, що проходить через неодимове скло, має надзвичайно різкі смуги поглинання; скло використовується в астрономії для отримання різких смуг, за допомогою яких можна відкалібрувати спектральні лінії. Ще одне застосування полягає у створенні селективних астрономічних фільтрів для зменшення ефекту світлового забруднення від натрію та люмінесцентного освітлення при пропусканні інших кольорів.

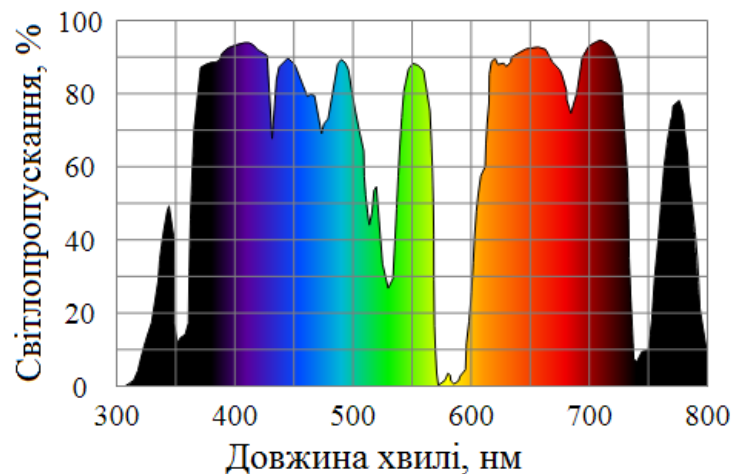


Рисунок 3.6 - Спектр пропускання світла фіолетового неодимового скла, що застосовується в світлофільтрах в телескопах

Неодимове скло використовується у кольорових фільтрах для фотографій у приміщенні, особливо при фільтрації жовтих відтінків від ламп розжарювання.

Подібним чином, неодимове скло широко використовується більш безпосередньо в лампах розжарювання. Ці світильники містять неодим у склі, щоб відфільтрувати жовте світло, в результаті чого біле світло більше схоже на сонячне.

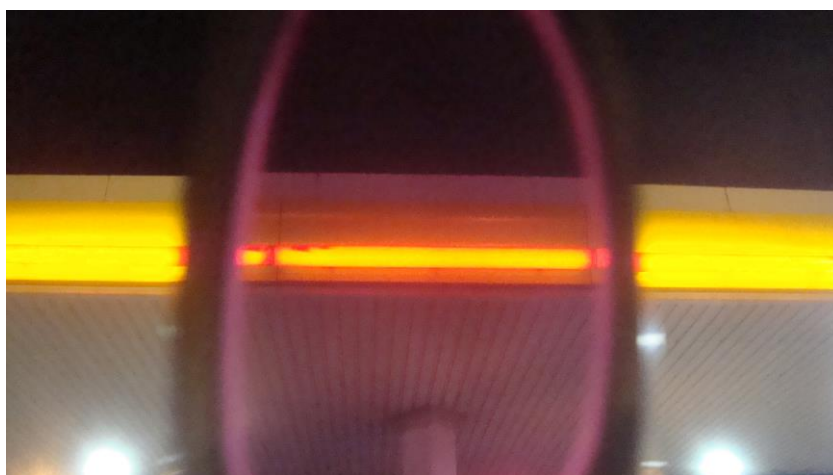


Рисунок 3.7 - Поглинання жовтого світіння дідімовими окулярами

Скло та штучні гранати, що містять неодим, застосовуються в якості активної середовища в лазерах, що генерують випромінювання в ближній інфрачервоній області спектру з довжиною хвилі близько 1,06 мкм.

С огляду на все вищесказане, можна зробити висновок, що неодимове скло є перспективним матеріалом для дослідження. До того ж, як вже зазначалось, параметри та використання неодимового скла залежить від вмісту неодиму у склі, тому треба розробляти точні методи виміру вмісту неодиму.

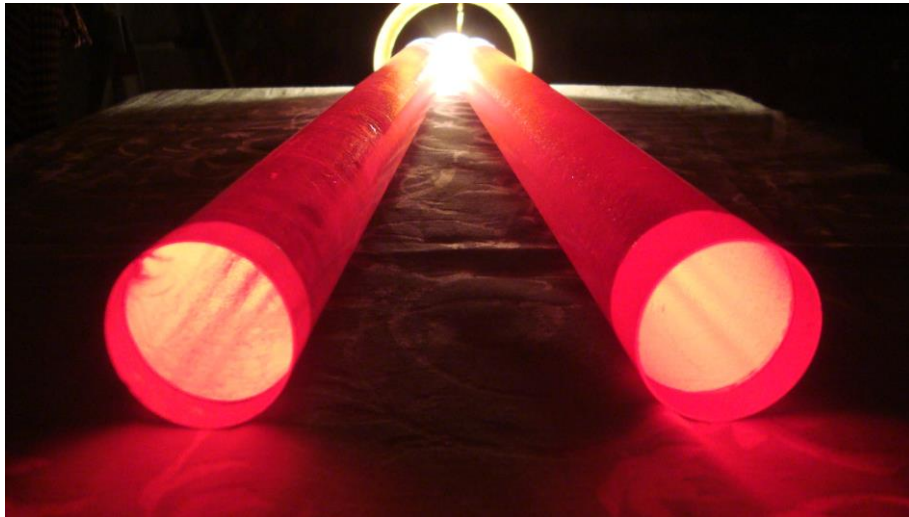


Рисунок 3.8 - Стержні з неодимового скла - активні елементи інфрачервоних лазерів.

3.3 Методика проведення експерименту та результати

3.3.1 Алюмосилікатна склокераміка та неодимове скло

В ході експерименту досліджувався ефект Фарадея в матеріалі на який було здійснено зовнішній вплив (механічне напруження). Метою експерименту було дослідження того, як впливає механічне напруження на ефект Фарадея і вплив магнітного поля на ефект лінійного подвійного подвійного променезаломлення. Для того, щоб розділити Q та V (горизонтальна або вертикальна лінійна та циркулярна відповідно) компоненти вектора Стокса виміри проводилися на подвоєній (для лінійної) та одиничній частоті (для циркулярної) з причин, що описувались у попередньому розділі.

Проводилися виміри лінійного двопронезаломлення без та при різних значеннях магнітного поля та виміри ефекту Фарадея без та при різних значеннях механічної напруги. До того ж, напрямок магнітного поля змінювали на паралельний, та антипаралельний до напрямку розповсюдження світла, що призводило до повороту площини поляризації вліво, та вправо на рівні значення кута відносно оптичної осі (так як

описувалось в розділі 1). Виміри проводились на певній довжині хвилі ($\lambda=630$ нм), а не на певному проміжку спектра. Таким чином ми отримали дві залежності – залежність кута повороту площини поляризації від напруженості магнітного поля при різних значеннях механічної напруги (рис. 3.9), та залежність лінійного подвійного променезаломлення від механічної напруги при різних значеннях магнітного поля (рис. 3.10.).

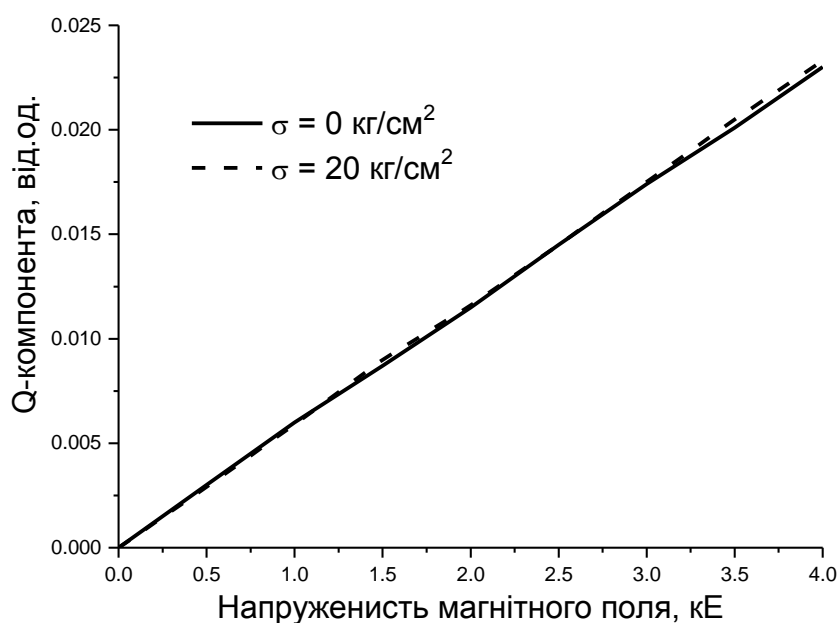


Рисунок 3.9 – Залежність Q-компоненти вектора Стокса від напруженості магнітного поля при двох крайніх значеннях стискаючого зусилля

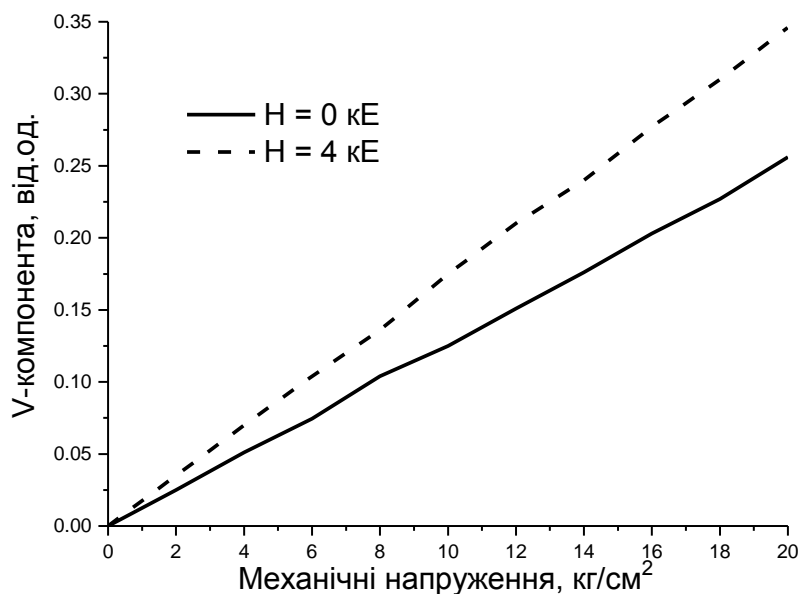


Рисунок 3.10 - Залежність V-компоненти вектора Стокса від стискаючого зусилля при двох крайніх значеннях напруженості магнітного поля

Як добре видно на рисунку 3.10 має місце значне збільшення величини інтенсивності V-компоненти у присутності магнітного поля. Оскільки величина ефекту Фарадея менша ніж зміна величини двопроменезаломлення при магнітному полі тієї ж напруженості, то з причин виникнення явища можна виключити перерозподіл інтенсивності світла між компонентами вектора Стокса внаслідок взаємодії поляризаційних ефектів. Отже, ефект, що спостерігається, пояснюється зміною властивостей, а саме величини коефіцієнту оптичного напруження у магнітному полі для металовмістного зразка. З іншого боку, як видно з рисунку 3.9, незважаючи на значну величину ефекту двопроменезаломлення залежність величини Q-компоненти від напруженості магнітного поля залишається незмінною. В цьому випадку не спостерігається, як перерозподіл інтенсивності світла із-за взаємодії поляризаційних ефектів, так і зміни величини константи Верде зразка від тиску у використаному діапазоні.

Таким чином можна зробити декілька висновків. Методика модуляційної поляриметрії спроможна розділяти та з великою чутливістю

реєструвати явища амплітудної та фазової анізотропії, при цьому не спостерігається перерозподіл інтенсивності світла між компонентами вектора Стокса внаслідок зваємодії поляризаційних ефектів. Направлені деформації, що можуть виникати у зразках внаслідок різноманітних зовнішніх та внутрішніх чинників не впливають на реєстрацію ефекту Фарадея. Магнітне поле змінює енергетичну картину зразків, що призводить до зміни їх властивостей у тому числі і механічних, принаймні у використаних в роботі речовинах.

Оскільки, в ході експерименту досліджувались зразу два зразки (алюмосилікатна склокераміка та неодимове скло) і всі вони дали один і той же результат, можна зробити припущення, що дані залежності мають універсальний характер. Проте потрібно проводити додаткові, більш глибокі дослідження з більшою кількістю зразків.

3.3.2 Кремній

З урахуванням результатів отриманих на модельних зразках, був досліджений кремній n-типу, вирощеного за методом Чохральського та легovanого оловом, концентрація якого $(1-2) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Лінійні розміри зразків були $\sim X \times Y \times Z = 1 \times 0,6 \times 0,25 \text{ см}$, при цьому всі зразки були вирізані таким чином, що їх XY-площина була перпендикулярна напрямку росту зливків [100]. Зразки піддавались стандартній обробці, що включає шліфування та полірування.

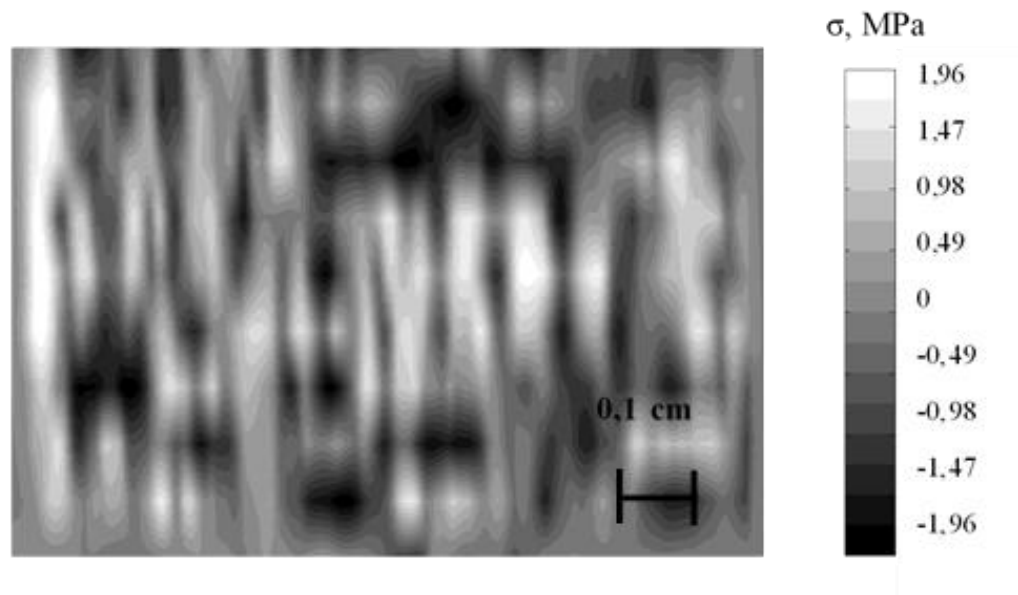


Рисунок 3.11 - Розподіл залишкових напружень в зразку кремнію p-типу легованому оловом

У зразку методом модуляційної поляриметрії, при довжині хвилі скануючого випромінювання $\lambda = 1.15$ мкм, було виміряно просторовий розподіл внутрішніх механічних напружень (рис. 3.11). З малюнку добре видно, що зразок має характерні смуги росту або смуги точкових дефектів. Основними джерелами залишкових напружень в кремнії є дефекти структури, домішки і ростові дефекти [28], а однією з основних причин виникнення смуг точкових дефектів може бути неомогенності розподілу олова в зливку при вирощуванні. Смуги точкових дефектів також можуть виникати в кристалі внаслідок наявності змінних градієнтів температури, існуючих в кристалі під час росту [29]. Будь-яке відхилення від постійного градієнта температури на фронті кристалізації викликає неоднорідне термічне розширення. Такий вплив призводить до виникнення внутрішніх механічних напружень в кристалі, що затвердіває [30]. Ще одним підтвердженням наявності дефектів структури, домішок і ростових дефектів може служити зменшення пропускання легovanого зразка $T = 39\%$ в порівнянні з чистим кремнієм тієї ж товщини $T = 48\%$ для використовуваної довжини хвилі.

Тестуючим стисненням зразка було визначено, що позитивний знак механічної напруги відповідає стисненню вздовж осі ОУ, а негативний - розтягуванню уздовж цієї осі. Також зіставлення величини вимірюваного сигналу пропорційного інтенсивності V-компоненти вектора Стокса і каліброваного зовнішнього деформуючого зусилля дозволило визначити абсолютні значення механічних напружень по всій площі зразка, які становили менше 2 МПа.

По центру зразка ($Y = 0.3$ см) вздовж напрямку ОХ було виміряно просторовий розподіл константи Верде при тій же довжині хвилі скануючого випромінювання $\lambda = 1.15$ мкм і величині напруженості магнітного поля 4 кЕ.

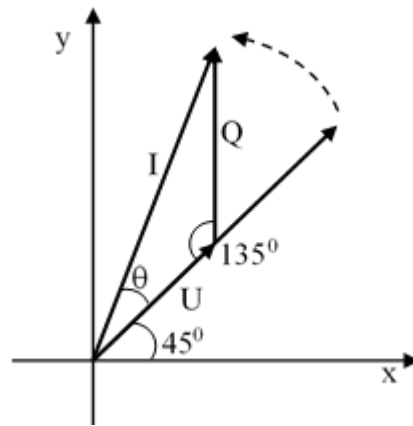


Рисунок 3.12 - Розкладання лінійно поляризованої хвилі з довільним азимутом площини поляризації на Q і U компоненти вектора Стокса

Як уже згадувалося в розділі 2 на подвоєній частоті модуляції вимірювався сигнал, величина якого залежить від інтенсивності Q компоненти вектора Стокса і пропорційний куту повороту площини поляризації лінійно поляризованого випромінювання в результаті дії ефекту Фарадея. Пропорційність інтенсивності Q компоненти і кута повороту легко вивести, використовуючи рис. 3.12. Представивши вектор, повернений на кут θ щодо початкового напрямку 45° , як суму Q і U - скористаємося теоремою синусів: $I/\sin(135^\circ) = Q/\sin\theta$. Отримаємо, що кут повороту дорівнює:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{Q}{\sqrt{2I}}\right) \quad (3.1)$$

де I загальна інтенсивність випромінювання. Отже, отримуємо вираз для константи Верде:

$$C_V = \frac{\arcsin\left(\frac{Q}{\sqrt{2I}}\right)}{Bd} \quad (3.2)$$

де, як згадувалося вище, B – магнітна індукція, а d – товщина зразка.

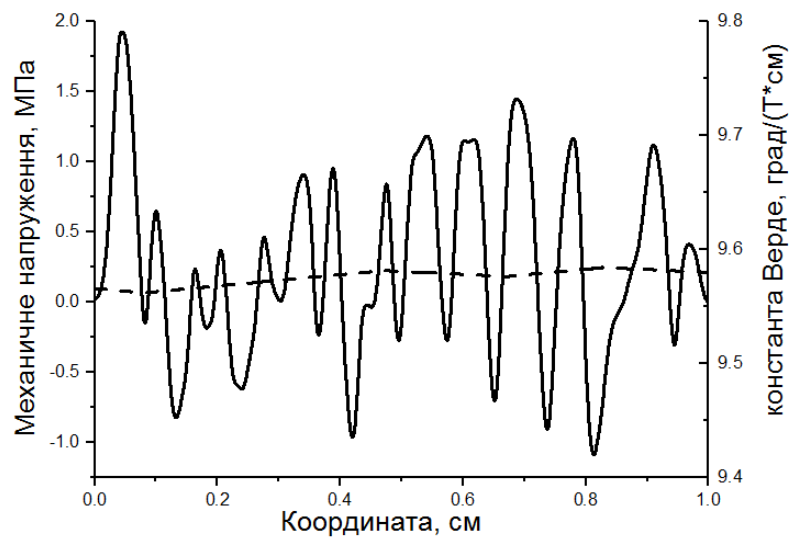


Рисунок 3.13 - Просторовий розподіл механічної напруги (суцільна) та константи Верде (штрихова) вздовж X координати зразка при $Y = 0.3$

Отриманий просторовий розподіл константи Верде вздовж OX осі зразка представлено на рис. 3.13 в порівнянні з відповідними внутрішніми механічними напруженнями. Як видно з рисунку, незважаючи на значний діапазон зміни величини залишкових напружень, величина константи Верде залишається сталою з урахуванням похибки вимірювання. Як було викладено вище, основою використаного в даній роботі методу є процедура вимірювання сигналів, що реєструються стандартним мікровольтметром, які

відповідають максимальному значенню сигналу, та сигналу, від досліджуваного зразка. Рівняння, що описує цю процедуру, має вигляд (3.2). Отже похибка вимірюваної величини визначається згідно теорії похибок сумою похибок величин, що є членами цього рівняння і з урахуванням паспортних даних конкретного приладу Unipan-232B, у якого $\Delta U=1\%$, загальна похибка складає $\Delta B = \Delta Q + \Delta I = 2\%$.

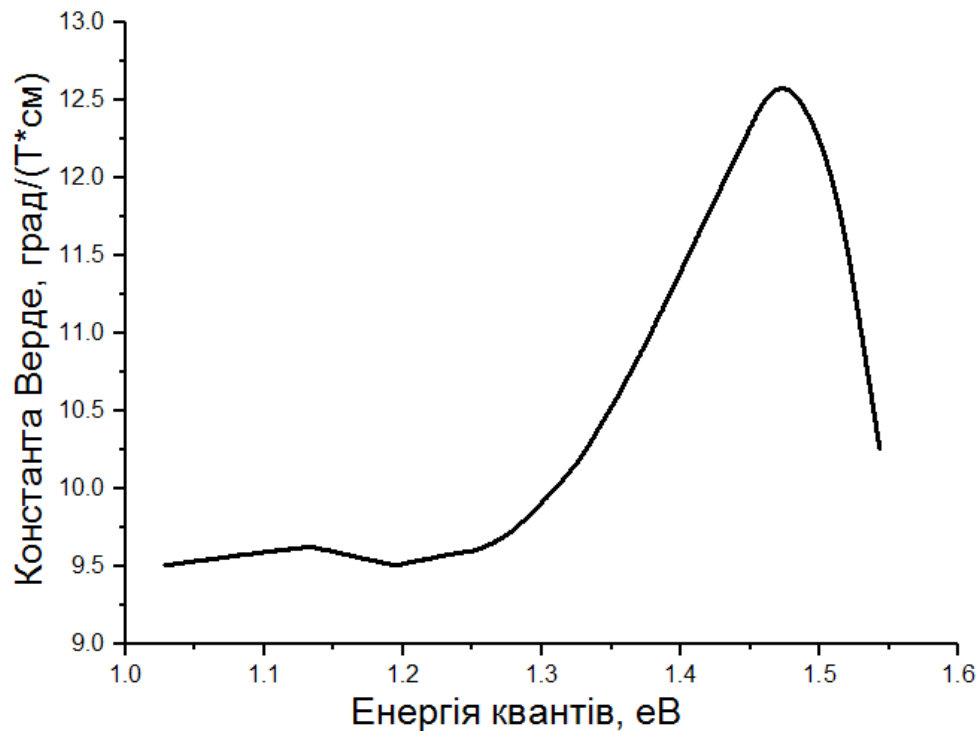


Рисунок 3.14 - Експериментальна залежність константи Верде від енергії квантів випромінювання для зразку з товщиною 100 мкм

В роботі було отримано спектральну залежність константи Верде при освітлені зразка досить широким – 0.025 см^2 променем, що вийшов з дифракційного монохроматору. Особливу цікавість викликав діапазон великих енергій, оскільки зрозуміло, що з боку малих енергій квантів, яка не досягає ширини забороненої зони кремнію $E_g = 1,12 \text{ еВ}$ ($T = 300 \text{ К}$), обмеження на пропускання немає. Воно з'являється з другого боку, коли $h\nu > E_g$ і коефіцієнт поглинання зростає по закону, близькому до квадратичного [31]. У цьому випадку кількісна величина границі може бути отримана із

умови напівпрозорості зразка, що виходить із закону поглинання Бугера-Ламберта, а саме $\alpha \cdot l = 1$. Для збільшення діапазону у бік великих енергій було взято зразок вирізаний з того самого зливка легovanого кремнію товщиною 100 мкм. Це дозволило досягти в нашому експерименті значення енергії квантів 1.55 eV з урахуванням використаної інтенсивності світла та чутливості фотодетектора.

З рисунку 3.14 перш за все видно, що залежність має характерні ознаки, розташовані дещо в певних областях спектру. Для інтерпретації цих особливостей слід зауважити, що зразок завдяки методу його приготування являє собою структуру, що складається з двох приповерхневих шарів та об'ємної частини. І якщо об'ємна частина зразка є досконалим монокристалом із незначною частиною дефектів, то приповерхневі шари з товщиною, що може бути зрівняною з товщиною об'ємної частини, відрізняються своїми властивостями від об'єму. Цим шарам завдяки тій структурі, що зумовлена механічною обробкою поверхні, властивий широкий спектр дефектів. Спектральна характеристика константи Верде такого шару не має резонансного характеру. Тому є частина характеристики, де фарадеївський кут не залежить від енергії, і яка повинна збільшуватися при зменшенні товщини зразка. Але конкуруючим механізмом зміни стану поляризації світла в ефекті є той, що пов'язаний із міжзонними переходами. Тому починаючи з величини енергії забороненої зони 1.12 eV переважаючий внесок дають міжзонні переходи.

У досліджуваному діапазоні енергій квантів міжзонні переходи є непрямими, тобто з участю фононів. Але при енергіях квантів $h\nu \approx 3$ eV переходи змінюються на прямозонні, що має проявлятися в ефекті Фарадея. Та щоб досягти цих значень енергії необхідно зменшувати товщину зразка із збереженням його властивостей, що майже неможливо.

Останнє зауваження стосується виявної здатності створеної вимірювальної системи. Вона визначається сукупністю параметрів, пов'язаних з технічними параметрами використаних приладів, таких як

інтенсивність джерела світла, величини індукції магніту, чутливості фотодетекторів, тощо. Тому з урахуванням відзначених обставин величина кута повороту, що зумовлена сигналами на рівні завад, становить $1 \cdot 10^{-5}$ рад.

Висновки до розділу

Розроблено алгоритм процесу вимірювання кута фарадеевського повороту, що передбачає врахування спектральних залежностей всіх оптичних елементів, використаних в установці, тим, що величина кута визначається із двох вимірювань - сигналу від зразка в магнітному полі, що пропорційний куту повороту площини поляризації лінійно поляризованого світла та сигналу безпосередньо інтенсивності лінійно поляризованого світла, що пройшло зразок.

Встановлено мінімальне значення кута, яке може бути зареєстроване методом поляризаційної модуляції і відповідає рівню шуму при використаних інтенсивності світла, величині індукції магнітного поля та коефіцієнтах підсилення електронних приладів. Його величина складає $1 \cdot 10^{-5}$ рад.

На додаткових зразках (алюмосилікатна склокераміка та неодимове скло) було показано, що методика модуляційної поляриметрії спроможна розділяти та з великою чутливістю реєструвати явища амплітудної та фазової анізотропії, при цьому не спостерігається перерозподіл інтенсивності світла між компонентами вектора Стокса внаслідок зваємодії поляризаційних ефектів. Направлені деформації, що можуть виникати у зразках внаслідок різноманітних зовнішніх та внутрішніх чинників не впливають на реєстрацію ефекту Фарадея. Магнітне поле змінює енергетичну картину зразків, що призводить до зміни їх властивостей у тому числі і механічних, принаймі у використаних в цих зразках.

Проведено вимірювання спектральної залежності константи Верде для зразків кремнію легованого оловом, та виявлено їх особливості, зумовлені властивостями поверхні зразків, та особливостями міжзонних переходів у кристалах кремнію.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ [32]

4.1 Опис ідеї проекту

Таблиця 4.1

Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробленні фізичні принципи реєстрації стану поляризації електромагнітного випромінювання та методів аналізу його компонентного складу з метою використання множини комбінацій величин компонент для характеристики об'єктів взаємодії за діелектричними властивостями майже у всіх агрегатних станах	1. Фундаментальні дослідження фізичних ефектів та процесів в твердому тілі.	Відкриття та дослідження різноманітних фізичних ефектів та процесів у твердому тілі.
	2. Дослідження структури та властивостей матеріалів.	Можливість контролювати якість матеріалів та дослідження властивостей нових матеріалів.
	3. Вимірювання просторового розподілу та величини внутрішніх механічних напружень в прозорих і непрозорих матеріалах та конструкціях.	Можливість контролювати якість готових матеріалів та конструкцій.

Таблиця 4.2

Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/	Техніко-економічні хара-	(потенційні) товари/концепції конкурентів	W (сла-	N (ней-	S (си-
-------------	---------------------------------	--	--------------------	--------------------	-------------------

п	ктеристики ідеї	Мій проект	Конкурент	бка сто- рона)	тра- льна сто- рона)	льна сто- рона)
1.	Економічні	1000 у.о.	40000 у.о.			+
2.	Призначення	Дослідження матеріалів, проте можна отримати більш інформативні результати	Дослідження матеріалів			+
3.	Надійності	Надійний	Надійний		+	
4.	Технологічні	Потребує налаштування кваліфікованими працівниками	Потребує налаштування кваліфікованими працівниками		+	
5.	Ергономічні	Система зручна в керуванні	Система зручна в керуванні		+	
6.	Органолептичні	-	-		+	
7.	Естетичні	Можна виконати в виді зручного приладу	Має привабливий вигляд	+		
8.	Транспортабельності				+	
9.	Екологічності	Екологічно	Екологічно		+	
10.	Безпеки	Безпечно	Безпечно		+	

Конкурент: i-Raman® Plus Highly Sensitive, High Resolution Fiber Optic Raman System

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 4.3

Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність тех- нологій	Доступність технологій
---------	--------------	-----------------------------	---------------------------	---------------------------

п				
1.	Дослідження матеріалів	Модулятор поляризації	Розроблено та створено ефективний фотопружний модулятор поляризації	Доступно, можливість виготовлення
		Джерело випромінювання	Наявні надійні, мініатюрні та досить дешеві лазери	Доступно
		Фотодіод	Наявні надійні, мініатюрні та досить дешеві фотодіоди	Доступно
		Лінзи та поляризатор	Наявно багато видів та різної якості	Доступно
		Прилади обробки сигналів	Наявні прилади, що мають великі розміри	Доступно, розробляється мініатюрний аналог
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: фотопружний модулятор поляризації, лазери з довжиною хвилі $\lambda=0.63$ мкм та $\lambda=1.15$ мкм, стандартні фотодіоди, лінзи та поляризатори.				

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Таблиця 4.4

Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/ п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	Багато
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	Великий (тяжко оцінити)
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Немає
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Немає
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	30%

Ринок є привабливим для входження.

Таблиця 4.5

Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
	Дослідження параметрів та структури матеріалів з високою виявною здатністю	Науково-дослідні організації, промисловість, та організації, що займаються дослідженням якості товарів	Поведінку клієнта формують перш за все мета використання; особливостей купівлі та експлуатації товару немає	Товар має вказувати параметри та структуру дослідних зразків з високою виявною здатністю, бути дешевшим за аналогічні

Продовження таблиці 4.5

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
------------------	---------------------------------	---	--	------------------------------------

			груп клієнтів	
				товари та бути надійним. Компанія пос- тачальник має надати доку- мент по експлу- атації товару, а також викону- вати технічну підтримку по необхідності.

Таблиця 4.6

Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Наявність кваліфіко- ваних кадрів	Продукт є наукоєм- ким тому потрібні люди з певними на- вичками	Пошук персоналу у науково-дослідних інститутах та органі- заціях
2.	Потреба в ресурсах	Для створення про- дукту потрібне техні- чне забезпечення та певні умови для тес- тування працездатно- сті	Укладання договорів з державними струк- турами для фінансу- вання та надання мо- жливостей для тесту- вання продукту

Таблиця 4.7

Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
------------------	---------------	-------------------------	-------------------------------------

1.	Конкуренція	Спонукає розробляти і виробляти нові продукти, знижувати витрати їх виробництва і вартість	Ускладнення структури та функціональної наповненості товару
2.	Попит	Існування стійкого попиту означає, що більшість клієнтів зацікавлені у введенні інновацій	Рекламна діяльність, просування товару у інтернеті

Таблиця 4.8

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції -олігополія	На ринку присутня невелика кількість фірм, які займаються випуском оптичних систем дослідження матеріалів	Підвищувати якість товару за рахунок використання передових технологій та залучення кваліфікованого персоналу
2. За рівнем конкурентної боротьби -національний	Місцезнаходження фірм не обмежується територіально; офіси розміщено у різних містах	Створювати веб-сайт компанії
3. За галузевою ознакою -внутрішньогалузева	Економічна боротьба між різними товаровиробниками, які діють в одній галузі економіки, виробляють і реалізують однакові товари, що задовольняють	Слідкувати за продуктами конкурентів

Подовження таблиці 4.8

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб
--------------------------------------	---	---

		бути конкурентоспроможною)
	одну й ту саму потребу, але мають відмінності у виробничих затратах, якості, ціні, тощо.	
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Конкуренція між товарами одного виду	Покращувати якість товару
5. За характером конкурентних переваг - цінова	Передбачає продаж продукції за більш низькими цінами, ніж конкуренти.	Продавати товар за низькою ціною.
6. За інтенсивністю - марочна	Боротьба носить явно виражений марочний характер, велике значення набуває брендинг	Реклама товару, створення символіки продукту

Таблиця 4.9

Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	Раман-спектроскопія	Немає	Товар продається безпосередньо розробниками	Вимоги до виявної спроможності, широти можливих застосувань та ціни	Існують інші методи дослідження матеріалів

Висновки:	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Інтенсивність до-	Немає	Постальники не	Товар має бути якіс-	Обмежень немає

	силь ви-сока, бо продукт є наукоєм-ким і тому не кожна фірма зда-тна розро-бити такий продукт		диктують умови ро-боти на ринку	ним та де-шевим	
--	---	--	---------------------------------	-----------------	--

Для того, щоб бути конкурентоспроможним на ринку для розробки товару потрібно залучати висококваліфікованих спеціалістів у галузі науки та техніки та налагодити виробництво портативної версії приладу.

Таблиця 4.10

Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1.	Ступінь задоволення потреб користувача.	Продукт має бути легким у користуванні, інформативним та мати відносно невисоку ціну.
2.	Якість розробки з точки зору оптимальності показників надійності	Продукт має видавати максимально достовірні результати.
3.	Наявність наукових ресурсів	Для створення високоякісного та стабільно працюючого приладу потрібні науковці, які здатні спроектувати портативний прилад, що буде мати максимально зрозуміле керування та легкий в обслуговуванні.
4.	Економічний (ціна товару)	Ціна товару не має бути занадто висока, щоб знайти потенційних покупців та сформувати імідж фірми.

Таблиця 4.11

Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з МПС						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3

1.	Ступінь задоволення потреб користувача.	15						+	
2.	Якість розробки з точки зору оптимальності показників надійності	14					+		
3.	Наявність наукових ресурсів	17					+		
4.	Економічний (ціна товару)	19	+						

Таблиця 4.12

SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: економічна (ціна товару), виявна здатність,	Слабкі сторони: Треба наладити випуск готових приладів, розробка портативної версії установки
Можливості: знижувати витрати на виробництво продукції, покращувати якість продукту; формування попиту у користувачів за рахунок рекламної діяльності.	Загрози: потрібно знайти людей з певними навичками і знаннями і запропонувати вигідні умови для співпраці до того як це зроблять конкуренти; технічне забезпечення та певні умови для тестування працездатності продукту.

Таблиця 4.13

Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Дослідження поведінки споживачів, пошук наукових ресурсів, розробка програмного забезпечення, створення реклами, взаємодія з науководослідними організаціями для перевірки працездатності програмного забезпечення	90 %	4 роки
2.	Дослідження поведінки споживачів, пошук інвесторів, пошук наукових ресурсів, створення програмного забезпечення, тестування	70%	6 років

Обрано альтернативу № 1

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Таблиця 4.14

Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/ п	Опис про- філю цільо- вої групи потенцій- них клієн- тів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтов- ний попит в межах ці- льової групи (сег- менту)	Інтенсив- ність кон- куренції в сегменті	Простота входу у сег- мент
1.	Науково-до- слідні орга- нізації	Готові	Високий	Низька	Середня
2.	Промисло- вість	Готові	Високий	Висока	Висока
Які цільові групи обрано: обрано цільову групу №1.					

Таблиця 4.15

Визначення базової стратегії розвитку

№ п/ п	Обрана альте- рнатива роз- витку проекту	Стратегія охоп- лення ринку	Ключові конкуренто- спроможні позиції від- повідно до обраної аль- тернативи	Базова стра- тегія розви- тку*
1.	1	За рахунок великих можливостей по об'ємах збуту това- рів (портфеля укла- дених контрактів на постачання) і продуктивності підприємство може добитися менших витрат	Витрати на виробництво	Стратегія лі- дерства на ви- тратах

Подовження таблиці 4.15

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
2.	2	Надання товару важливих з точки зору споживача відмітних властивостей, які роблять товар відмінним від товарів конкурентів. Така відмінність може базуватися на об'єктивних або суб'єктивних, відчутних і невідчутних властивостях товару бути реальною або уявною.	Формування попиту у користувачів за рахунок спеціального функціоналу та високої якості товару	Стратегія диференціації

Обрано стратегію диференціації.

Таблиця 4.16

Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1.	З урахуванням рівня чутливості - так	Так	Ні	Стратегія заняття конкурентної ніші

Таблиця 4.17

Визначення стратегії позиціонування

№ п/ п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформулювати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1.	Якість отриманих результатів	Лідерства на витратах.	Низька ціна та висока виявна здатність методу	Оптимальне співвідношення ціна/якість, на-укоємкість, співпраця.

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Таблиця 4.18

Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	Висока виявна здатність та широкий спектр застосувань	Висока виявна здатність та широкий спектр застосувань	Висока виявна здатність
2.	Мала ціна	Ціна на порядок менша ніж у конкурентів	Невисока (в порівнянні з конкурентами) ціна на готовий прилад

Таблиця 4.19

Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові
I. Товар за задумом	Прилад, що спроможний до повного Стокс-поляриметричного аналізу, зручний до користування та при цьому має високу виявну здатність та невисоку ціну.

Подовження таблиці 4.19

Рівні товару	Сутність та складові		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Низька ціна 1000 у.о.	М	Вр
	2. Висока виявна здатність	М	Тх
	3. Широкий спектр застосувань	М	Тл
	4. Легкий у користуванні	М	Е
	5. Безпечно для використання	М	Ор
	Якість: чудова		
	Пакування: захисна коробка для транспортування.		
III. Товар із підкріпленням	Марка: "SUPER-PUPER MPS 3000"		
	До продажу: гарантія, надання кредиту.		
	Після продажу: монтаж, доставка, обслуговування.		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: захист інтелектуальної власності (патенти).			

Таблиця 4.20

Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
	-	35000 – 2000000 у.о.	10000 у.о. і вище	1000 – 15000 у.о.

Таблиця 4.21

Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка за- купівельної поведінки ці- льових клієн- тів	Функції збуту, які має викону- вати постачаль- ник товару	Глибина ка- налу збуту	Оптимальна система збуту
	Замовлення товару на сайті або безпосередньо у розробників	Встановлення контакту, інформування, поділ, зберігання, сортування	Канал нульового рівня	Виробник безпосередньо збуває продукцію покупцям

Таблиця 4.22

Концепція маркетингових комунікацій

№ п/ п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
	Використання товару для дослідження матеріалів.	Прямі - канал комунікації, коли інформація передається безпосередньо від інформатора до інформованої особи	Низька ціна, якість отриманих результатів, висока виявна здатність	Поширення знань про підприємство, підтримання позитивних емоцій у осіб, що придбали товар, поширення відомостей про сервіс, демонстрація солідарності підприємств, безумовного	Звернення засноване на відмінностях між рекламованим товаром і тим, що пропонують конкуренти. Звернення ґрунтується на тому чи іншому мотиваційному підході, покликано впливати на

Подовження таблиці 4.22

№ п/ п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали ко- мунікацій, якими ко- ристуються цільові клі- єнти	Ключові позиції, обрані для позиціону- вання	Завдання ре- кламного по- відомлення	Концепція рекламного звернення
				виконання взятих на себе зобов'язань; інформація про випробу- вання товару і поліпшення його задля споживачів.	споживчі переваги по- купців - на- приклад, фу- нкціональну перевагу, за- доволення, імідж, захо- плення і альтруїзм.

Висновки по розділу

В даному розділі розроблявся стартап проект, що дозволило найбільш повно оцінити комерційну перспективу модуляційної поляриметрії для дослідження матеріалів та фундаментальних фізичних явищ в твердому тілі. Потенційними споживачами можуть бути науково-дослідні організації та виробництво. Ставку зроблено на суттєві, в порівнянні з конкурентами, переваги – високу виявну здатність та ціну.

ВИСНОВКИ

В ході написання магістерської було проведено літературний огляд з теми магістерської дисертації, обґрунтовано, на основі останніх досліджень, що ефект Фарадея є сучасним, та досить перспективним методом дослідження матеріалів. Поводження ефекту Фарадея при дії неоднорідних фізичних полів досліджувались за допомогою модуляційної поляриметрії.

Також був проведений детальний аналіз головної складової дослідної установки – фотопружного модулятора поляризації. Показали, що фотопружний модулятор поляризації, з огляду на суперечливі вимоги, що висуваються до модулятора поляризації, є одним з найкращих варіантів. До цих вимог відносяться: необхідність функціонування в широкому спектральному діапазоні випромінювань; можливість перебудови частоти модуляції; можливість регулювання глибини модуляції (величин кутів еліптичності або орієнтації); малі значення керованої потужності; хімічну, механічну стійкість і міцність, і ряд інших. Позналились з фізичним принципом його функціонування та конструкцією.

Був проведений аналіз процесу поляризаційної модуляції в загальному випадку (еліптична поляризація) і продемонстрували його можливості в здійсненні повного поляризаційного аналізу. Для цього за розрахунком на основі матричної оптики показали, що при використанні оптичної схеми з модулятором поляризації можливо вимір кожної з компонент вектора Стокса окремо, в тому числі і в разі часткового поглинання світла.

Розроблено алгоритм процесу вимірювання кута фарадеєвського повороту, що передбачає врахування спектральних залежностей всіх оптичних елементів, використаних в установці, тим, що величина кута визначається із двох вимірювань - сигналу від зразка в магнітному полі, що пропорційний куту повороту площини поляризації лінійно поляризованого світла та

сигналу безпосередньо інтенсивності лінійно поляризованого світла, що пройшло зразок.

Встановлено мінімальне значення кута, яке може бути зареєстроване методом поляризаційної модуляції і відповідає рівню шуму при використаних інтенсивності світла, величині індукції магнітного поля та коефіцієнтах підсилення електронних приладів. Його величина складає $1 \cdot 10^{-5}$ рад.

На додаткових зразках (алюмосилікатна склокераміка та неодимове скло) було показано, що методика модуляційної поляриметрії спроможна розділяти та з великою чутливістю реєструвати явища амплітудної та фазової анізотропії, при цьому не спостерігається перерозподіл інтенсивності світла між компонентами вектора Стокса внаслідок зваємодії поляризаційних ефектів. Направлені деформації, що можуть виникати у зразках внаслідок різноманітних зовнішніх та внутрішніх чинників не впливають на реєстрацію ефекту Фарадея. Магнітне поле змінює енергетичну картину зразків, що призводить до зміни їх властивостей у тому числі і механічних, принаймі у використаних в цих зразках.

Проведено вимірювання спектральної залежності константи Верде для зразків кремнію легованого оловом, та виявлено їх особливості, зумовлені властивостями поверхні зразків, та особливостями міжзонних переходів у кристалах кремнію.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. И.Е. Матяш, Б.К. Сердега. Особенности поляризационно-модуляционной диагностики диэлектрической анизотропии материалов. // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника.- 2005.- №40.- с.155-161.
2. Мосс Т.С. Оптические свойства полупроводников. - М.: ИИЛ, 1961.- 304 с.
3. Матяш И.Е. Плеохроизм оптических и фотоэлектрических явлений в кубических кристаллах с индуцированной анизотропией: дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.07 / Матяш Игорь Евгеньевич. – К., 2005. – 127с.
4. Крауфорд Ф. Волны. Перевод с английского под редакцией Шальникова А.И. и Вайсенберга А.О. - М.: Наука, 1976.- 528 с.
5. Ландсберг Г.С. Оптика. - М.: ГИТТЛ, 1957.- 760 с.
6. Прохоров А.М. Дихроизм // Физическая энциклопедия.-М.,1988.-т.1.- с.693-694.
7. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. Перевод с английского под редакцией Мотулевич Г.П. - М.: ГРФМЛ, 1973.- 720 с.
8. Прикладная оптика. Под редакцией Заказова Н.П. - М.: Машиностроение, 1988.- 312 с.
9. Марьенко В.В., Савенков С.Н. Общая классификация поляризационных систем на основе их анизотропных свойств.//Оптика и спектроскопия, 1995.- т.78.- №4.- с. 682-684.
10. Crowther J. The life and discoveries of Michael Faraday / James Arnold Crowther. // Society for promoting Christian knowledge. – 1920. – С. 54–57.
11. Mansuripur M. Optics and Photonics News / Masud Mansuripur. // Optics and Photonics News. – 1999.

12. Vojna D. Faraday effect measurements of holmium oxide (Ho₂O₃) ceramics-based magneto-optical materials / David Vojna. // High Power Laser Science and Engineering. – 2018. – №6.
13. BENNETT H. S. Faraday Effect in Solids / H. S. BENNETT, E. A. STERN. // PHYSICAL REVIEW. – 1965. – №137. – С. 448–461.
14. Schatz P. The Faraday Effect / P. Schatz, A. McCaffery. // Quarterly Reviews, Chemical Society. – 1969. – С. 552–584.
15. Сивухин Д. В. Общий курс физики / Д. В. Сивухин. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, Т. 4. Оптика. 2005. – 792 с.
16. Moss T. Determination of the Effective Electron Mass in GaAs by the Infra-Red Faraday Effect / T. Moss, A. Walton. // Proceedings of the Physical Society. – 1959. – №79. – С. 131–133.
17. Theoretical perspectives on spintronics and spin-polarized transport / S. Das Sarma, J. Fabian, Xuedong Hu, I. Zutic. // IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS. – 2000. – С. 2821–2826.
18. Cavity enhanced Faraday rotation of semiconductor quantum dots / [Y. Li, D. Steuerma, J. Berezovsky та ін.]. // APPLIED PHYSICS LETTERS. – 2006. – №88.
19. Pump-probe Faraday rotation and ellipticity in an ensemble of singly charged quantum dots / I.Yugova, M. Glazov, E. Ivchenko, A. Efros. // PHYSICAL REVIEW B. – 2009. – №80.
20. Сердега Б.К. Модуляційна поляриметрія: монографія – Київ: Наук. Думка, 2011. – 238 с
21. Jaspersen S.N., Schnatterly S.E. An improved method for high reflectivity ellipsometry based on a new polarization modulation technique. // The review of scientific instruments.-1969.-v.40.-№6.-p.761-767.
22. Запаский В.С. Методы высокочувствительных поляриметрических измерений. // Журнал прикладной спектроскопии.-1982.-т.37.-№2.-с.181-196.

23. Никитенко Е.В., Сердега Б.К. Исследование свойств модулятора поляризации излучения в поляризметрических оптических схемах. // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника.- Киев: Наукова думка.- 1998.-в.33.-с.102-108.

24. Джерард. А., Берч Дж.М. Введение в матричную оптику.- М.:Мир,1978.-344 с.

25. Монохроматор МДР - 23 [Электронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: http://lud.bmstu.ru/indus/demo/scripts/html/direct/help/help_d_5.htm.

26. Стеценко М. О. Ефекти плазмонних резонансних взаємодій в наноструктурованих плівках в модуляційно-поляризаційному представленні : дис. канд. фіз.-мат. наук : 01.04.07 / Стеценко Максим Олександрович – К., 2016. – 166 с.

27. Руденко С.П. Розмірні ефекти лінійної амплітудної анізотропії у явищі поверхневого плазмонного резонансу: дис. канд. фіз.-мат. наук: 01.04.07 / Руденко Світлана Петрівна. – К., 2011. – 144с.

28. V.V. Voronkov, The mechanism of swirl defects formation in silicon, J. Crys. Growth 59(3) (1982) 625-643, DOI:10.1016/0022-0248(82)90386-4.

29. T. Taishi, Y. Ohno, I. Yonenaga, K. Hoshikawa, Influence of seed/crystal interface shape on dislocation generation in Czochralski Si crystal growth, Phys. B 401–402 (2007) 560-563 DOI:10.1016/j.physb.2007.09.021.

30. T. Marek, M. Werner, P. Lavéant, G. Gerth and P. Werner, Dislocation Structures in Si:C Films: Generating “Plateau-Like” Surface Defects?, Crys. Res. Tech. 35(6-7) (2000) 769–773, DOI:10.1002/1521-4079(200007)35:6/7<769::AID-CRAT769>3.0.CO;2-S.

31. Dash W.C., Newman R. Intrinsic Optical Absorption Single-Crystal GE and Si at 77 K and 300 K.//Phys.Rev.1955.-v.99.-№4.-p.1151-1155.

32. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для

студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.